La PLANÈTE TERRE et ses EXTRAORDINAIRES PROPRIÉTÉS

Émergence, adaptation, autorégulation

Philippe **Bertrand**

ellipses

La PLANÈTE TERRE et ses EXTRAORDINAIRES PROPRIÉTÉS

Émergence, adaptation, autorégulation

Philippe **Bertrand**

ellipses

Conception graphique couverture : Léonie MONZEL
Conception graphique intérieur : Aline DEVILLARD
Mise en pages : Soft Office

ISBN 9782340-112421
Dépôt légal : novembre 2025
© Ellipses Édition Marketing S.A.
8/10 rue la Quintinie 75015 Paris

Le Code de la propriété intellectuelle et artistique n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1er de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr

Avant-propos

La Terre n'est pas simplement une planète porteuse de vie. Avec le temps, elle est désormais devenue la vie elle-même, celle dont nous faisons partie, celle qui relie entre eux tous les êtres vivants, tous les milieux de vie, l'air, l'eau, les sols, les sédiments, ainsi que les parties internes, les croûtes, le manteau, et le noyau. La Terre est devenue, au prix d'échanges d'énergie et d'information avec l'Univers, un système qui se construit et s'entretient par lui-même, c'est-à-dire un système en autopoïèse. L'être humain est la seule espèce disposant des capacités cognitives qui lui permettent non seulement d'exploiter la planète, mais d'apprécier et de comprendre ses secrets merveilleux. Par-là, il prend aussi conscience du rôle qu'il joue dans ce fonctionnement complexe. Que le maintien de conditions habitables pour une civilisation humaine moderne passe nécessairement par la réduction de son impact environnemental ! Que notre sort et encore plus celui des générations à venir dépendent de notre capacité à gérer cet impact pour le rendre compatible avec les capacités de renouvellement des ressources et de régénération des milieux de vie !

Ce petit livre est dédié aux amoureux de la Terre et, d'une manière générale, à tous ceux qui aspirent à comprendre sa beauté et ses extraordinaires propriétés, héritées de l'histoire cosmique depuis le Big Bang jusqu'à la formation du système solaire, ou acquises lors de son histoire évolutive depuis 4,5 milliards d'années.

La connaissance disciplinaire des phénomènes terrestres est immense mais, bien que très pointue, elle est fragmentée et n'offre par elle-même que peu d'explications sur le fonctionnement global de la Terre. Or la Terre est un système complexe où chaque élément, à chaque échelle de temps et d'espace, interagit avec tous les autres. C'est pourquoi, tout en s'appuyant sur les connaissances disciplinaires pointues de la physique, de la chimie, de la biologie, de la géologie, de l'océanographie et de la climatologie, ce livre a pour ambition de mettre en exergue, pour le grand public, le caractère systémique et autopoïétique de notre planète, issu d'un exceptionnel niveau de structuration de la matière. C'est à ce niveau que s'exercent, au-delà de la physique, les propriétés d'émergence, d'évolution adaptative et d'autorégulation.

La lecture de cet ouvrage se veut un voyage agréable et n'exige aucun bagage scientifique préalable. J'ai conscience que certaines parties explicatives demandent une lecture patiente et un certain niveau de concentration. Mais cette difficulté tient à la complexité des phénomènes naturels en jeu et non à une inaccessibilité par défaut de connaissances scientifiques préalables. La compréhension est accessible à tout lecteur motivé ! Ma recommandation est d'aborder les parties explicatives en prenant son temps.

Si l'ordre des 4 premiers chapitres répond à une certaine cohérence pédagogique, la lecture de cet ouvrage peut néanmoins être abordée de manière non linéaire dans les 3 suivants, selon l'intérêt que le lecteur peut avoir pour certains sujets.

CHAPITRE 1

L'état le plus structuré de la matière

1. Hasard et nécessité ?

La Terre actuelle est un aboutissement improbable – mais possible puisqu'il existe ! – des propriétés combinatoires de la matière. On peut alors se demander, comme l'ont fait Jacques Monod et Christian de Duve à propos de la vie, quelles sont les parts de hasard et de nécessité dans cette structuration improbable de la matière.

Jacques Monod (1910-1976), prix Nobel de Physiologie-Médecine en 1965, est venu à penser que la part de hasard est si énorme dans l'origine de la vie qu'il s'agit peut-être d'un phénomène unique. Il écrivit alors : *L'univers n'est pas gros de vie, ni la biosphère de l'homme. Notre numéro est sorti au jeu de Monte Carlo. Quoi d'étonnant à ce que, tel celui qui vient d'y gagner un milliard, nous éprouvions l'étrangeté de notre condition ? L'homme sait enfin qu'il est seul dans l'immensité indifférente de l'Univers d'où il a émergé par hasard*.

Christian de Duve *(1917-2013)*, prix Nobel de Physiologie-Médecine en 1974, fut en revanche convaincu que la part de hasard dans l'origine de la vie est faible en raison des propriétés combinatoires de la matière. Celles-ci, au fur et à mesure du temps, créent un ensemble de nouvelles conditions, c'est-à-dire une contingence, rendant l'émergence de la vie très probable. Il écrivit alors : *La vie appartient à la trame même de l'Univers. Si elle n'était pas une manifestation obligatoire des propriétés combinatoires de la matière, il eut été absolument impossible qu'elle prenne naissance naturellement.* Cette vision, dite du *hasard contraint*, peut toutefois être modulée selon le caractère inéluctable, ou non, que l'on prête à cette évolution. Le mot *obligatoire* qu'emploie Christian de Duve indique que, selon lui, les propriétés combinatoires de la matière doivent inéluctablement aboutir à la vie en certains lieux et à certains moments de l'Univers. La tentation est grande, pour certains courants de pensée à caractère métaphysique, ou même religieux, de reformuler cette idée à propos de l'origine de l'homme. Cela va dans le sens du principe anthropique qui affirme que les constantes universelles de l'Univers et les propriétés combinatoires de la matière, qui ne sont

pourtant que des produits scientifiques de l'esprit humain, ont rendu inéluctable l'apparition de la vie, avec l'être humain en aboutissement ultime. Un dessein intelligent, celui d'une transcendance divine se trouverait derrière cela. Bien évidemment, il n'y a pas d'aboutissement ultime dans l'évolution biologique et nul ne sait ce que seront les étapes et les protagonistes futurs. C'est pour cela que les obédiences religieuses s'opposent si vivement à la théorie de l'évolution alors qu'elles s'accommodent plus facilement des autres grandes théories scientifiques comme la relativité, la physique quantique ou le Big Bang. La théorie de l'évolution, bien que confortée elle-aussi par les faits et les expériences, subit des assauts de plus en plus violents visant à la discréditer, voire à la censurer dans l'éducation.

Dans les textes qui suivent, les commentaires relatifs aux parts respectives du hasard et de la nécessité, sont bien sûr limités aux arguments strictement scientifiques. Mais ils montreront que, même en évitant tout dogmatisme religieux, la partition n'est pas si simple, qu'elle aboutit à une indécidabilité philosophique, et que l'émergence de la vie elle-même a introduit une part d'imprévisibilité dans la structuration de la matière.

2. La structuration de la matière, à la fois microscopique et macroscopique

La matière que nous avons sous nos yeux est macroscopique. Nous en voyons le poids, les formes et les couleurs mais pas les détails microscopiques comme les molécules et les atomes, ni les détails encore plus fins comme les noyaux d'atomes ou leurs composants fondamentaux, les neutrons et les protons, ni les composants fondamentaux des neutrons et des protons que l'on appelle des quarks. En fait, le verbe « voir » sous-entend ici deux états bien différenciés de la structuration de la matière, dont l'un peut être perçu directement par nos sens et l'autre non. Lorsque suffisamment d'interactions s'établissent entre des particules microscopiques, alors la matière prend l'aspect d'un corps macroscopique. À l'inverse, lorsque la matière se disperse en molécules ou en atomes, elle prend l'aspect et les propriétés respectives d'un gaz ou d'un plasma. La science nous a donné les moyens technologiques de « voir », au-delà de nos sens, ces particules microscopiques. Mais en poursuivant notre raisonnement, on peut aussi imaginer la dispersion des protons et des neutrons, et même celle des quarks. On aboutit alors à une situation où des particules quantiques fondamentales, dispersées et insécables, comme les quarks,

évoluent sans interactions entre elles. Elles sont alors totalement invisibles puisque toute tentative de les « voir » revient à établir des interactions avec elles et à rompre leur isolement. En fait, dans une telle situation, ce sont les étranges propriétés quantiques qui dominent. Par exemple, le principe d'incertitude de Werner Heisenberg nous dit qu'avant d'avoir interagi avec une particule quantique isolée, c'est-à-dire avant de l'avoir observée, on ne peut savoir en même temps quelle est son énergie et sa localisation. Pire ! Cette particule peut *a priori* se trouver à n'importe quel endroit de l'Univers, elle n'a en fait pas de localisation. Dans notre vie courante, nous préférons bien sûr avoir affaire à des objets macroscopiques, pesants, colorés, formatés et bien localisés. Ces propriétés macroscopiques dérivent des innombrables interactions qui se sont établies entre particules quantiques depuis le Big Bang, origine théorique de l'univers dans le modèle cosmologique actuel, datée d'environ 13,8 milliards d'années.

3. La beauté dans la structuration de la matière

Au travers des interactions entre ses structures microscopiques, la matière acquiert sa structuration macroscopique, c'est-à-dire une morphologie et éventuellement une distribution de couleurs ou de textures. C'est celle-ci qui nous inspire un sentiment subjectif de beauté ou d'esthétique.

Alan Turing est un mathématicien britannique qui a jeté les fondements de l'informatique en créant la machine de Turing, et qui a travaillé sur le décodage du code *Enigma*, utilisé par l'armée allemande pendant la Seconde Guerre mondiale. À la fin de sa vie, il s'est également penché sur la question de la genèse des formes et a montré qu'elles pouvaient être générées par des algorithmes informatiques en créant des états stationnaires numériques. Des structures similaires ont été observées en chimie des milieux liquides où un ensemble de réactions chimiques se produisent en aboutissant à un état stationnaire macroscopique, c'est-à-dire une stabilité de ce que l'on peut voir. En informatique comme en chimie, la visualisation macroscopique est stable, mais le système microscopique sous-jacent est dynamique.

Des structures de type « Turing » peuvent aussi être observées dans le domaine du vivant, par exemple des alternances régulières de bandes de couleur sur les écailles, le pelage ou le plumage d'un animal, ou sur la cuticule d'une plante. Ici, l'interrogation porte sur les phénomènes du développement embryonnaire. À partir de cellules souches disposant des mêmes gènes, un organisme se développe avec des

changements progressifs contrôlés par l'environnement de chaque cellule. Les gènes y sont sensibles au travers de mécanismes dits épigénétiques qui modifient leur état d'activation (expression) ou d'inhibition avec éventuellement une sélection naturelle (darwinienne) des cellules. Ces phénomènes sont une grande voie de la recherche biologique d'aujourd'hui, que l'on appelle « évo-dévo » pour signifier la convergence des questions fondamentales de l'évolution darwinienne et de celles du développement embryonnaire et corporel. Bien que ceci soit très spéculatif, on peut imaginer que les structures biologiques de Turing ne sont qu'un simple détail de l'état stationnaire général de l'individu adulte.

Des structures ressemblant à des formes biologiques ont également été étudiées dans le domaine des fractales. Celles-ci sont caractérisées par des structures simples qui se reproduisent à toutes les échelles d'espace. Par exemple, la fougère de Barnsley (**Figure 1.1**) est construite par algorithme avec une prescription structurante simple qui s'applique à toutes les échelles depuis l'état microscopique initial (simple, peu structuré) jusqu'à l'état macroscopique (très structuré, fractal). Des structurations fractales similaires, comme le triangle de Sierpinski, peuvent aussi être construites par algorithme descendant depuis l'état macroscopique. Sur un plan esthétique, donc subjectif, on peut mentionner ici la grande beauté des structures de Mandelbrot, le pionnier de la science des fractales, même si celles-ci n'ont pas, à ma connaissance, d'équivalents dans le vivant.

Finalement, la genèse d'une structure macroscopique compliquée, éventuellement belle pour nos sens, n'a pas besoin d'une grande quantité d'information initiale. Une partie de l'information décrit l'état initial, et l'autre, génétique, décrit un jeu de règles de progression, très limité, qui s'applique étape par étape (algorithme), avec modification de la contingence à chaque étape (incrémentation de l'information décrivant la contingence). Bien entendu, ce que des algorithmes humains peuvent faire, la nature peut le faire. Une structuration initiale porteuse de l'information génétique est le guide qui s'applique à chaque étape du développement. Les flux de matière et d'énergie sont les conditions nécessaires à ce développement. Enfin l'entité développée constitue à chaque étape une contingence qui contraint les possibilités du développement à l'étape suivante.

Dès qu'on prend le temps d'observer ce qui nous entoure, la beauté des structures terrestres nous émerveille. Certaines sont issues du développement des corps des êtres vivants et de l'évolution des espèces, comme les coraux, les fleurs, les pelages, les plumages, les écailles, les coquilles. D'autres sont des effets de phénomènes

physiques sur l'atmosphère, comme les levers et les couchers de soleil, les aurores polaires, les nuages ondulatoires, lenticulaires, stratifiés (**Figure 1.1**). Mais le système Terre est aussi, dans son ensemble, d'une étonnante beauté car nous pouvons désormais le contempler depuis l'espace et saisir les mouvements à grande échelle des cyclones, des grands panaches volcaniques, des efflorescences printanières du phytoplancton, des plissements tectoniques, de l'écoulement des calottes glaciaires vers l'océan.

Mais la connaissance que ce livre a l'ambition de révéler porte en elle-même une beauté moins visuelle, celle d'une structure planétaire globale qui s'est construite en plusieurs milliards d'années, et qui a acquise l'extraordinaire propriété d'autopoïèse.

La structuration terrestre de la matière peut prendre des formes multiples, permanentes ou éphémères. Certaines ne sont pas biologiques, comme des nuages stratifiés (en haut), et ne répondent qu'aux lois combinatoires de la matière. D'autres sont biologiques comme une feuille de fougère, le pelage d'un zèbre, ou la coquille d'un mollusque. Celles-ci sont imprévisibles car elles répondent à la fois aux lois combinatoires de la matière et à la sélection naturelle. Certaines sont néanmoins modélisables par un simple algorithme mathématique appliqué sur un contexte initial prescrit, comme la fougère fractale de Barnsley (en bas). Ces structures locales peuvent nous inspirer le sentiment subjectif de la beauté. Mais la Terre est dans son ensemble, un objet encore beaucoup plus structuré et qui a acquis l'extraordinaire propriété d'autopoïèse, c'est-à-dire de se construire et se maintenir par elle-même pour peu qu'elle puisse échanger de l'énergie avec l'Univers environnant. Cette beauté-là ne peut être perçue au travers de nos seuls sens. L'ambition de ce livre est de partager les connaissances dont nous disposons aujourd'hui afin que chaque lecteur puisse percevoir à quel point la Terre est belle.

Photo de nuages © P. Bertrand

4. Quelle est l'origine de la matière ?

La structuration de la matière a connu bien des étapes depuis le Big Bang, au fur et à mesure que des conditions nouvelles apparaissaient dans l'Univers. Dans les premiers instants, des quarks se sont rapidement associés, probablement au hasard des rencontres, sous l'effet d'une interaction, dite nucléaire forte, pour former des protons et des neutrons. Les premiers protons constituaient de fait les premiers noyaux de l'élément hydrogène, très majoritaire au moment du Big Bang, et encore majoritaire aujourd'hui dans l'Univers. Puis des protons et des neutrons se sont associés, au hasard des rencontres, sous l'effet d'une interaction, dite nucléaire faible, pour commencer à former d'autres noyaux composites, quoiqu'encore très simples, ceux de l'hélium et du lithium. À ce stade l'Univers était d'une grande simplicité chimique, avec seulement 3 éléments présents !

Pour synthétiser de nouveaux noyaux, composés de plus de protons et de neutrons, il fallait de nouvelles conditions, celles qui apparurent au cœur des premières étoiles, environ 75 millions d'années après le Big Bang. Or, ces premières étoiles, comme les suivantes, les actuelles et les futures, se forment sous l'effet d'une des grandes forces de l'Univers, celle de l'attraction gravitaire.

Nous avons tous l'expérience de l'attraction gravitaire des corps, celle qui nous lie à la Terre par notre poids ou celle qui fait tomber les gouttes de pluie. Parmi les grandes théories de la physique, certaines d'entre elles se sont attachées à décrire cette attraction, aussi appelée interaction gravitaire. Copernic, Kepler et Galilée en ont été des pionniers, mais la première formalisation théorique véritable fut celle de Newton à l'aube du XVIII^{e} siècle. Pour Newton les corps s'attirent en fonction de la distance qui les sépare et de leurs masses respectives. Il en résulte les mouvements gravitaires que sont la chute des objets sur la Terre, les trajectoires orbitales des planètes et des astéroïdes autour d'une étoile, et la contraction à grande échelle de la matière dans l'espace avec pour corollaire la formation d'étoiles, de galaxies et de trous noirs. Cette première théorie de la gravité s'applique dans un espace euclidien homogène à 3 dimensions, c'est-à-dire dans un espace où règnent les lois de la géométrie euclidienne, celles qui nous sont familières. Elle garde toute son actualité et reste largement applicable dans notre monde terrestre, ainsi qu'à l'échelle des mouvements orbitaux du système solaire. Toutefois, aux très grandes échelles de temps et d'espace, certains effets observés ne sont pas prévus par la théorie

newtonienne. Une autre théorie de la gravité, plus étendue, lui a donc succédé, celle de la relativité générale d'Einstein (1915). Einstein a pour cela rompu avec la vision d'un espace homogène à 3 dimensions, et lui a substitué la vision d'un espace déformable à 4 dimensions où le temps est l'une de ces dimensions. Dans la vision d'Einstein, le mouvement gravitaire newtonien est remplacé par la déformation de l'espace-temps due à la concentration des masses de matière.

Dans les théories de Newton et d'Einstein les grandeurs sont continues et les équations déterministes. La discontinuité et le hasard n'y ont pas de place. Tout y est connu du passé comme de l'avenir. Seule notre incapacité à donner un état initial infiniment précis nous empêche d'explorer l'avenir ou le passé lointain à la lumière de ces théories. En revanche les théories de la physique quantique font intervenir la notion de discontinuité et d'aléa, c'est-à-dire de hasard et de probabilité, dans l'évolution de l'énergie, de la masse, du temps et même de l'espace. Nous sommes encore loin d'une « théorie du tout » qui relierait ces deux grands pans de la physique, mais la question de l'origine de la masse, c'est-à-dire de la matière, établit un premier point de connexion. En physique on considère que la masse d'un objet lui confère une certaine inertie, ce qui signifie qu'il faut lui apporter de l'énergie pour l'accélérer. On parle d'ailleurs de masse inerte pour la différencier de la masse grave, c'est-à-dire de celle dont dépend l'attraction gravitaire des masses entre elles. Jusqu'à présent la science n'a jamais constaté de différence mesurable entre la masse inerte et la masse grave. La théorie quantique nous dit que la masse existe par le fait que certaines particules sont freinées par un champ appelé le champ de Higgs, apparu peu de temps après le Big Bang, lorsque l'univers fut suffisamment refroidi. La découverte récente, en 2012, du boson de Higgs, particule issue de l'interaction entre le champ de Higgs et les particules freinées par celui-ci, est venue confirmer la prévision théorique de plusieurs physiciens faite en 1964. Dès lors, l'existence de la masse, c'est-à-dire de la matière, ou son absence, disposait d'une explication théorique issue de la physique quantique.

5. D'où vient la diversité chimique de la matière ?

Les étoiles se forment par la concentration gravitaire de matière au sein de grands nuages cosmiques de gaz et de poussières, résultant eux-aussi d'une concentration gravitaire préalable. À partir d'une certaine masse accumulée, les conditions physiques de pression et de confinement au cœur d'une étoile permettent la fusion

des noyaux des éléments chimiques présents pour synthétiser des noyaux plus lourds. C'est ainsi que l'étoile s'allume en amorçant la fusion nucléaire en son cœur, d'où elle tire l'énergie de son rayonnement.

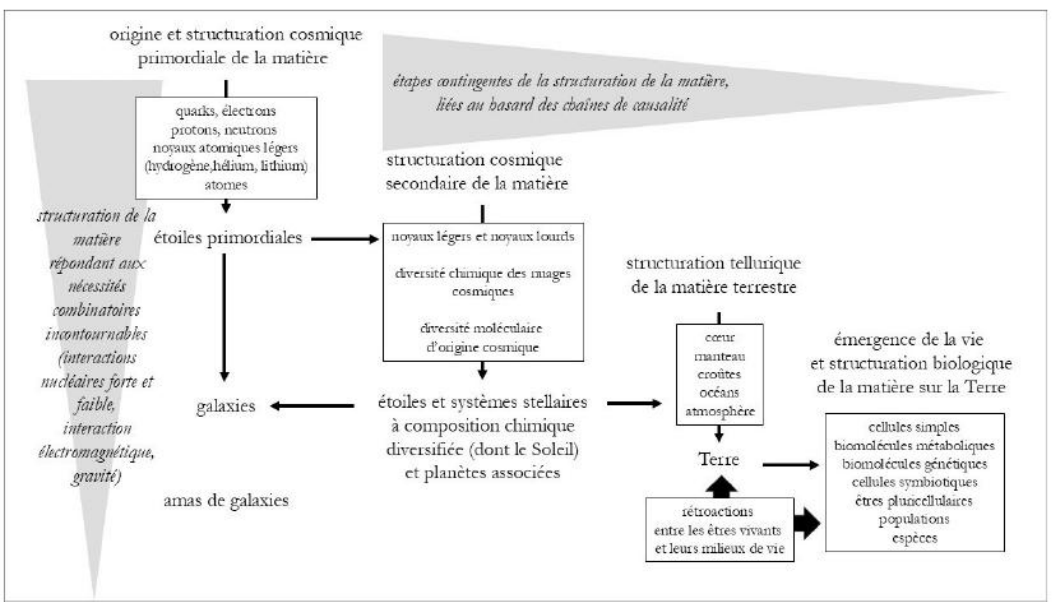
La formation d'étoiles est un phénomène général qui répond à des conditions cosmiques, celles de la présence de matière et du champ de gravité qui l'accompagne. Le rôle du hasard y est donc faible (**Figure 1.2**). Il est limité à certaines questions. Où, quand, et avec quoi se forme une étoile ? On ne peut prévoir la naissance d'une étoile en particulier car les fluctuations de la répartition de la matière dans l'espace relèvent d'une infinité de causes, dont la naissance et la mort d'étoiles antérieures, qui s'enchaînent dans le temps. De la même façon que les prévisions météorologiques deviennent chaotiques, c'est-à-dire impossibles, au-delà de 8 à 10 jours, celles de la prévision de la naissance des étoiles l'est aussi à l'échelle de temps qui les concerne.

Dans les premières étoiles, formées essentiellement à partir de l'hydrogène primordial issu des premiers instants du Big Bang, des noyaux plus complexes ont pu se constituer, comme ceux de l'hélium, du lithium, du bore, du carbone, de l'azote et de l'oxygène. Une telle synthèse, par fusion nucléaire, se produit aussi dans les étoiles actuelles comme notre soleil dont le combustible principal reste l'hydrogène pour encore longtemps. Mais en vieillissant, les étoiles épuisent leur hydrogène et fusionnent de plus en plus d'autres noyaux, tout en fabricant de nouveaux éléments, de plus en plus lourds. C'est ainsi qu'apparaissent des éléments qui participent aussi à la diversité chimique que nous observons sur la Terre, comme le sodium, le magnésium, l'aluminium, le silicium, le phosphore, le soufre et le chlore. Lorsque les étoiles ne peuvent plus émettre suffisamment d'énergie par la fusion nucléaire, elles s'écroulent sur elles-mêmes puis explosent, redispersant dans l'univers les nouveaux éléments fabriqués. Les étoiles des générations suivantes héritent d'un univers où la diversité chimique est plus grande et sont aptes à produire des noyaux d'éléments encore plus lourds, jusqu'au noyau du fer composé de 26 protons et de 30 neutrons.

Pour des noyaux encore plus lourds, la fusion nucléaire demande plus d'énergie qu'elle n'en émet et la contrainte du confinement gravitaire ne suffit plus. Il faut donc mobiliser une énergie externe, qui n'est disponible que lors d'évènements cosmiques très puissants, comme les explosions d'étoiles massives en fin de vie, les *supernovae* et les éventuelles formations d'étoiles à neutrons qui en résultent. Ces évènements poursuivent donc le travail de fusion nucléaire des étoiles et accroissent encore la diversité chimique de la matière en produisant par exemple du cobalt, du nickel, du cuivre, mais aussi des éléments beaucoup plus lourds comme l'uranium,

composé de 92 protons et de 143 ou 146 neutrons. Les noyaux plus lourds que le plomb (82 protons, 124 à 126 neutrons) sont en général instables et se désintègrent naturellement en libérant une énergie sous forme de rayonnements. C'est la radioactivité naturelle. Fort heureusement pour nous, la plupart des éléments très lourds se désintègrent rapidement. Mais, il se trouve que certains ne se désintègrent que très lentement, comme la variété (ou isotope) 238 de l'Uranium (92 protons et 146 neutrons). Après 4,5 milliards d'années, la moitié des noyaux d'uranium 238 (^{238}U) formés lors d'un évènement cosmique subsistent encore. Bien après leur formation, la radioactivité naturelle de ces noyaux lourds peut donc encore s'exprimer au sein d'étoiles ou de planètes auxquelles ils auraient été incorporés. Plus qu'un phénomène néfaste, la radioactivité naturelle a constitué une heureuse opportunité pour le destin de la Terre, ce que je montre dans la suite de cet ouvrage.

La matière se structure sous le contrôle des propriétés combinatoires de la matière (sens vertical, du haut vers le bas). Mais le hasard des chaînes de causalités (non prévisibles) modifie la répartition de l'énergie et de la matière déjà structurée dans l'univers, ce qui peut créer, aléatoirement, de nouveaux contextes (ou contingences) locaux qui offrent des possibilités d'une plus grande structuration de la matière, et ainsi de suite (sens horizontal de la gauche vers la droite). La vie peut ainsi émerger là où se créent les conditions planétaires d'une habitabilité primordiale, se développer, modifier les milieux de vie (donc d'habitabilité), et s'adapter à des conditions d'habitabilité qui se modifient.


origine et structuration cosmique primordiale de la matière
étapes contingentes de la structuration de la matière, liées au hasard des chaînes de causalité
quarks, électrons
protons, neutrons
noyaux atomiques légers (hydrogène,hélium, lithium)
atomes
structuration cosmique secondaire de la matière
structuration de la matière répondant aux nécessités combinatoires incontournables (interactions nucléaires forte et faible, interaction électromagnétique, gravité)
étoiles primordiales
noyaux légers et noyaux lourds
diversité chimique des nuages cosmiques
diversité moléculaire d'origine cosmique
structuration tellurique de la matière terrestre
cœur
manteau
croûtes
océans
atmosphère
émergence de la vie et structuration biologique de la matière sur la Terre
galaxies
étoiles et systèmes stellaires à composition chimique diversifiée (dont le Soleil) et planètes associées
Terre
cellules simples
biomolécules métaboliques
biomolécules génétiques
cellules symbiotiques
êtres pluricellulaires
populations
espèces
rétroactions entre les êtres vivants et leurs milieux de vie
amas de galaxies

6. La structuration stellaire et planétaire de la matière

Dans beaucoup de régions de l'Univers, quelques milliards d'années après le Big Bang, la matière disposait donc d'une grande diversité chimique en raison de la vie et de la mort de générations d'étoiles antérieures. Ceci était une évolution inéluctable guidée par les lois physiques, elle ne devait rien au hasard. En revanche, la naissance de notre Soleil dans l'une de ces régions il y a environ 4,6 milliards d'années était imprévisible car les fluctuations de densité de la matière cosmiques sont chaotiques. En modifiant le champ de gravité, ces fluctuations provoquent des mouvements de la matière environnante autour de certains points. C'est ainsi que les étoiles commencent à se former, par milliards lorsque la densité des nuages cosmiques est suffisante. Individuellement, notre Soleil est donc né d'une grande part de hasard, mais il appartient à un phénomène cosmique plus général, inéluctable, guidé par les lois physiques.

Les étoiles naissantes attirent à elles la matière environnante sous forme d'un disque aplati comme le prévoient les théories de la gravité et du mouvement. Mais une part de la matière du disque subit aussi des fluctuations gravitationnelles internes qui donnent naissance à des grumeaux de matière condensée qui, en grossissant, forment des planètes, ou de simples astéroïdes. Tandis que le disque se trouve peu à peu nettoyé de sa matière dispersée, les gaz et les poussières, les mouvements des corps et l'évolution de leurs masses, peuvent aboutir à des orbites stabilisées. La structuration de la matière se poursuit ainsi au sein des systèmes stellaires et des systèmes planétaires en formation.

Lorsque le Soleil eut une masse suffisante, les réactions de fusion nucléaire en son cœur se déclenchèrent. L'étoile s'alluma ! Ce faisant, elle produisit un vent de particules solaires et des rayonnements très puissants qui repoussèrent les éléments et composés légers, les moins soumis à l'attraction gravitaire du soleil, vers l'extérieur du disque. Dans les régions internes du disque, les plus proches du Soleil, ne subsistèrent alors que des poussières et corps solides. Ceux-ci donnèrent lieu aléatoirement à la formation de 4 planètes rocheuses, ou telluriques, Mercure, Vénus, la Terre et Mars, où les composés volatiles sont présents mais minoritaires. Des planètes majoritairement gazeuses se formèrent au contraire dans des régions plus lointaines, où la matière volatile avait été repoussée par l'allumage du Soleil. L'histoire est sans doute un peu plus compliquée car la plus grosse des planètes,

Jupiter, a peut-être commencé à se former sur une orbite beaucoup plus éloignée du Soleil que l'orbite actuelle, et s'en serait rapprochée sous l'effet du déplacement de masses, donc du champ de gravité, lors de l'évolution précoce du disque solaire. C'est l'hypothèse d'un « Jupiter chaud », qui postule que Jupiter aurait ainsi connu une phase de croissance dans la zone interne du système solaire, celle occupée aujourd'hui par les planètes telluriques. Cette première migration aurait eu diverses conséquences, dont celle de réinjecter des objets contenant de l'eau dans la zone interne du système solaire, cette eau qui aurait ensuite participé à la croissance des planètes telluriques actuelles. Mais l'orbite de Jupiter aurait ensuite migré vers des zones plus éloignées, jusqu'à sa position actuelle, toujours à la faveur du déplacement des masses dans le disque au fur et à mesure que se structurait le système solaire. Ce faisant, l'influence gravitaire de Jupiter aurait contribué à nettoyer la zone interne du disque en n'y laissant que des corps orbitaux solides déjà bien constitués, favorisant par-là la formation ultérieure des planètes telluriques.

Tous ces grands phénomènes nucléaires et gravitaires qui s'exercent lors de la formation d'un système stellaire sont inéluctables. Même la formation de planètes, telluriques et gazeuses, est, sinon inéluctable, au moins très fréquente comme le montre l'exploration des planètes extrasolaires, ou exoplanètes, depuis une trentaine d'années. Ce qui relève davantage du hasard sont les conditions cosmiques d'habitabilité, celles qui permettent notamment à l'eau liquide de pouvoir, potentiellement, exister à la surface d'une planète. Il s'agit notamment de la distance à l'étoile et des conditions de rotation de la planète sur elle-même. Un chapitre ultérieur de ce livre est dédié aux conditions d'habitabilité et je reviendrai sur la part cosmique de ces conditions, héritées de la formation du système solaire. Mais ne nous y trompons pas, la vie ne choisit pas une planète au hasard. Elle ne peut s'installer que sur celles que les conditions cosmiques ont, au hasard, rendues potentiellement habitables. Les conditions d'habitabilité font donc partie des contraintes naturelles qui s'exercent pour minimiser le rôle du hasard dans la poursuite de la structuration de la matière par la vie.

Mais bien avant la vie, la matière non vivante constitutive de la Terre, continua à se structurer, au-delà de la diversité chimique créée par les étoiles qui ont précédé le Soleil, et au-delà de la structuration gravitaire du système solaire lui-même. Cette phase de structuration de la matière terrestre, que j'appelle ici tellurique, allait d'ailleurs participer à l'élaboration d'autres conditions d'habitabilité, tout aussi nécessaires que les conditions cosmiques héritées.

7. La structuration de la matière non vivante sur la Terre

La Terre s'est formée, il y a un peu plus de 4,5 milliards d'années, par l'accumulation gravitaire de gaz, de poussières et de corps solides de taille plus importante. Certains de ces corps solides étaient eux-mêmes des planètes en formation. Les multiples impacts qui accompagnèrent cette agrégation de matière dégagèrent une énergie thermique considérable. Tout au long de sa formation, la Terre était une sphère de matière extrêmement chaude, avec des parties internes où régnait une certaine fluidité, et une surface qui était un océan magmatique.

Mais, dans une telle sphère de matière, les effets gravitaires continuent de s'exercer inéluctablement. En d'autres termes, la matière la plus lourde coule progressivement vers le centre de la sphère et s'y concentre, aux dépens de la matière plus légère qui se trouve alors concentrée dans les parties externes de la sphère. D'un point de vue chimique cela signifie que les éléments les plus lourds, abondants comme le fer et le nickel, ou rares comme l'uranium, se concentrent au centre de la sphère, alors que les éléments les plus légers, comme l'hydrogène, l'hélium, le carbone, l'azote, l'oxygène, le soufre, se concentrent dans les couches périphériques de la sphère. La matière se structure donc de manière concentrique, ou en peau d'oignon, pour aboutir à un cœur riche en fer et en nickel, un manteau riche en aluminium, silicium, calcium, magnésium, et une atmosphère riche en composés d'hydrogène, de carbone, d'oxygène, de soufre et d'azote.

Il faut toutefois garder à l'esprit que ces effets gravitaires s'exercent non seulement sur des éléments chimiques individuels, mais aussi sur des entités moléculaires ou macroscopiques liant parfois des éléments lourds et des éléments légers. C'est pourquoi des éléments légers peuvent se retrouver, dans une certaine proportion, dans les couches profondes de la Terre et inversement, des éléments lourds dans les couches superficielles.

Avec la formation des planètes, le disque solaire se trouve progressivement nettoyé de la plus grande partie de sa matière dispersée. Les impacts en viennent donc à se raréfier et les planètes commencent à se refroidir alors que se poursuit leur différenciation gravitaire interne. C'est ainsi que la Terre, comme ses 3 sœurs telluriques, Mercure, Vénus et Mars, se dote d'une croûte externe, solide, plus légère que le manteau, formée de roches riches en oxydes de silicium et d'aluminium. Les composés volatiles d'éléments légers continuent de dégazer à travers la croûte et de former l'atmosphère primitive. Les plus légers, l'hydrogène et l'hélium, sont les plus

rapides à s'y concentrer, mais ils sont rapidement expulsés de l'attraction terrestre par le vent solaire. Finalement l'atmosphère primitive se charge principalement d'azote, de gaz carbonique, d'oxydes de soufre, et d'eau. À cause du gaz carbonique et de la vapeur d'eau, la pression au sol de l'atmosphère primitive est estimée à plusieurs dizaines de fois la pression de l'atmosphère actuelle.

Dans les parties internes de la Terre, les conditions physiques de pression, de température, et de composition de la matière ont abouti à des compartiments différenciés, dont certains sont aujourd'hui fluides et d'autres non. Le noyau interne actuel de la Terre est une boule solide. Le noyau externe, légèrement fluide, est animé par des mouvements de convection thermique. Comme il est riche en fer, ces mouvements sont la cause du champ magnétique terrestre, très important pour l'habitabilité. Le manteau inférieur est solide, ses mouvements ne sont perceptibles qu'à des échelles de temps de plusieurs siècles. Enfin, le manteau supérieur est un peu plus fluide que le manteau inférieur, mais sa viscosité est néanmoins très grande. Ce n'est qu'en cas de remontée et de dépressurisation rapide que les matériaux du manteau peuvent se transformer en magma très fluide tel que celui que nous voyons surgir lors des éruptions volcaniques.

Tous ces phénomènes de structuration tellurique de la matière sont inéluctables car guidés par les lois physiques, celles de la gravité, de l'électromagnétisme et de la chimie, et de la thermodynamique. Seules, leurs manifestations locales sont sujettes au hasard des chaînes de causalité.

8. La première habitabilité de la Terre

Au tout début de l'histoire de la Terre, une croûte solide existe donc, ainsi qu'une certaine quantité d'eau gazeuse dans l'atmosphère. Ces deux conditions étaient, sinon suffisantes, du moins indispensables à la formation d'eau liquide à la surface de la planète. Des études géochimiques de cristaux datant de 4,4 milliards d'années, des zircons inclus dans de très vieilles roches sédimentaires en Australie, ont indiqué que de l'eau liquide existait déjà à cette époque. C'est-à-dire seulement 100 millions d'années après la fin de l'accrétion terrestre ! Le refroidissement de l'atmosphère, et sa charge en vapeur d'eau, furent donc déjà suffisants pour que de l'eau liquide se forme. N'imaginons pas ici une fraîche pluie de printemps ! En raison de la pression très importante de l'atmosphère primitive, la vapeur d'eau a certainement pu se condenser à des températures élevées, peut-être 200 °C ou plus. Or de telles

températures étaient encore bien trop élevées pour la vie. Elles tenaient notamment à l'important effet de serre de l'atmosphère primitive, majoritairement composée de gaz carbonique.

Mais l'apparition de l'eau liquide changea brutalement la donne et enclencha un mécanisme chimique inéluctable par lequel la Terre se libéra de son effet de serre excessif. L'eau liquide, dans laquelle le gaz carbonique peut se dissoudre, constitue en effet un réacteur chimique qui assure le passage entre l'état gazeux et l'état solide du carbone et réciproquement. Nous examinerons ultérieurement les détails de cette transformation. Mais retenons ici que, pour la structuration de la matière, la formation d'eau liquide due au premier refroidissement de la Terre permit peu à peu de transformer le carbone gazeux de l'atmosphère terrestre initiale en carbone solide, sous forme de roches carbonatées ! Ce faisant, l'effet de serre initial diminua peu à peu, et la température au sol baissa jusqu'à atteindre des valeurs compatibles avec la vie, inférieures à 100 °C. On ne sait pas combien de temps a demandé cette évolution. J'ai tendance à penser qu'elle fut rapide, ne prenant que… quelques dizaines de millions d'années, mais l'hypothèse la plus généralement admise est que la première habitabilité terrestre fut acquise il y a environ 4 milliards d'années, soit 400 millions d'années après la première apparition attestée de l'eau liquide.

9. Quand la structuration de la matière devient adaptative

L'émergence de la vie, sur Terre ou ailleurs, n'est pas un phénomène comme les autres. Certes, la matière vivante se structure en répondant à de lois physiques comme celle de la thermodynamique, de l'électromagnétisme et de la chimie, mais ses propriétés vont bien au-delà de celles de la matière structurée non vivante issue des évolutions antérieures.

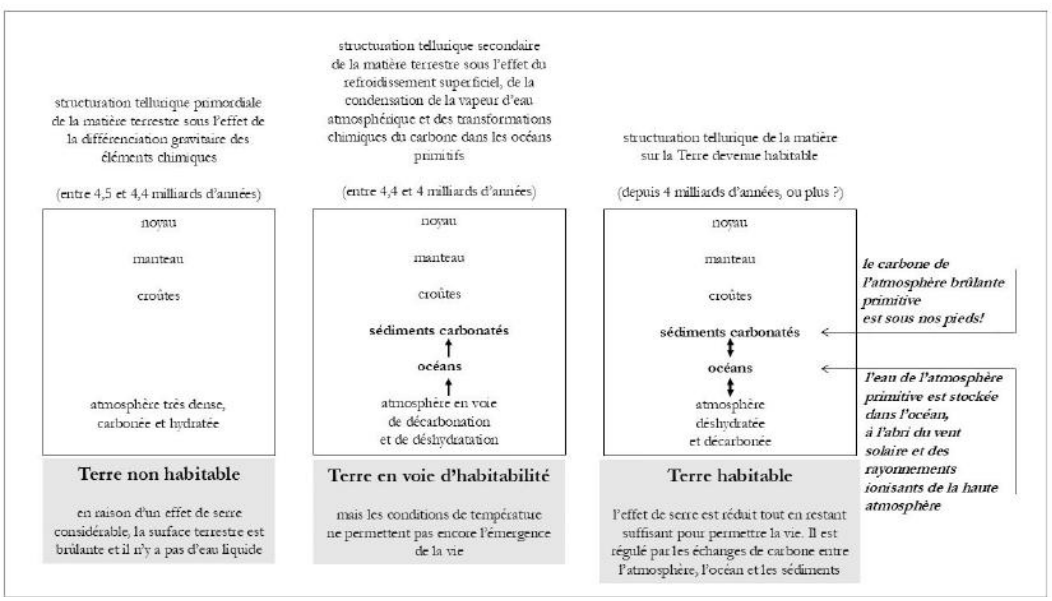
On dit qu'une particularité majeure de la vie est qu'elle est capable de se répliquer, ou de se reproduire. Mais au-delà de cette simple formulation, il convient d'examiner ici ce qu'elle signifie plus précisément en termes de structuration de la matière.

Les êtres vivants sont le siège de deux formes de structuration de la matière, l'une est macroscopique, c'est celle des corps, l'autre est microscopique, c'est celle des gènes. On perçoit ici que, lorsque la matière se structure, elle ne se contente pas d'agréger des masses, celles des protons et des neutrons, puis celles des atomes, puis celles des molécules, mais qu'elle donne lieu à des formes ou à des combinaisons qui portent en elles une information. Cette notion d'information, qui s'accroît avec la

structuration de la matière, est intégrée dans les théories physiques. J'y reviendrai. Bien entendu, les êtres vivants sont dépositaires d'une quantité considérable d'information, que ce soit celle qui permet de décrire leur corps (ou phénotype), ou celle de leur patrimoine génétique (ou génotype).

Disons-le tout net ! On ne connaît pas vraiment les processus chimiques qui ont conduit à la vie. Ce qui est certain c'est que la vie relève à la fois de nécessités, celles des lois physiques, chimiques et thermodynamiques, et du hasard. Cette part aléatoire tient au fait que, à un moment donné, lorsque la Terre fut devenue habitable, en un lieu donné, un système chimique autoréplicatif s'est mis en place. Cela signifie que des molécules déjà complexes réagirent avec des composés chimiques simples de leur environnement pour se reproduire tout en formant parfois des molécules encore plus complexes. On ne peut considérer qu'un tel système chimique, dit prébiotique, est déjà vivant, mais il esquisse une des caractéristiques majeures des êtres vivants qui est de se reproduire. Mais qu'est-ce qui se reproduit vraiment ?

Les différentes étapes de la structuration tellurique de la matière terrestre, au cours desquelles certaines conditions primordiales d'habitabilité, complémentaires des conditions cosmiques, ont été acquises. La formation très précoce des premiers océans a protégé la Terre contre la perte d'eau. Mais comme les océans sont aussi des médiateurs chimiques entre les formes gazeuses, liquides et solides du carbone, ils ont permis le transfert de la plus grande partie du carbone atmosphérique (CO_2) vers une forme solide (sédiments carbonatés), réduisant ainsi l'énorme l'effet de serre de l'atmosphère initiale jusqu'à un niveau potentiellement habitable.


structuration tellurique primordiale de la matière terrestre sous l'effet de la différenciation gravitaire des éléments chimiques
(entre 4,5 et 4,4 milliards d'années)
noyau
manteau
croûtes
atmosphère très dense, carbonée et hydratée
Terre non habitable
en raison d'un effet de serre considérable, la surface terrestre est brûlante et il n'y a pas d'eau liquide
structuration tellurique secondaire de la matière terrestre sous l'effet du refroidissement superficiel, de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique et des transformations chimiques du carbone dans les océans primitifs
(entre 4,4 et 4 milliards d'années)
noyau
manteau
croûtes
sédiments carbonatés
océans
atmosphère en voie de décarbonation et de déshydratation
Terre en voie d'habitabilité
mais les conditions de température ne permettent pas encore l'émergence de la vie
structuration tellurique de la matière sur la Terre devenue habitable
(depuis 4 milliards d'années, ou plus ?)
noyau
manteau
croûtes
sédiments carbonatés
océans
atmosphère déshydratée et décarbonée
Terre habitable
l'effet de serre est réduit tout en restant suffisant pour permettre la vie. Il est régulé par les échanges de carbone entre l'atmosphère, l'océan et les sédiments
le carbone de l'atmosphère brûlante primitive est sous nos pieds!
l'eau de l'atmosphère primitive est stockée dans l'océan, à l'abri du vent solaire et des rayonnements ionisants de la haute atmosphère

Le corps d'un système chimique ou d'un être vivant, c'est-à-dire son « tout », naît, se développe éventuellement, se réplique éventuellement, et disparaît. Mais, au passage de son existence, un système chimique ou un être vivant reproduit l'information qui lui a permis de naître et de se développer, et qui permettra à d'autres entités similaires à lui-même de naître et de se développer.

La reproduction biologique reste un mystère

La reproduction d'entités régulées, cellules, plantes, animaux, ou plutôt leur réplication imparfaite, au hasard de variations génétiques et environnementales aléatoires, est la cause de la diversité sur laquelle s'opère la sélection naturelle et dont dépend la plasticité évolutive d'une espèce, d'un peuplement ou même de la biosphère planétaire globale. Mais à quelle nécessité répond le besoin de reproduction ? C'est une des questions les plus intrigantes de la biologie pour laquelle on n'a, semble-t-il, aucune réponse. Elle a même fait l'objet de recherches dans le domaine des mathématiques et de la logique avec les travaux inachevés de von Neumann dans les années 1950 sur la théorie des automates reproducteurs. Certains biologistes – mais ce pourrait être aussi des physico-chimistes ! – suggèrent que, pour des cellules très simples (procaryotes), la nécessité de la reproduction tient au grossissement de la cellule et au fait que leur membrane atteint sa limite de résistance par rapport à la masse enveloppée et qu'elle éclate pour reformer immédiatement 2 cellules plus petites. Ce phénomène serait quasi-similaire à l'éclatement d'une grosse bulle de savon en formant deux, ou plusieurs, petites bulles. Mais dès qu'on envisage une structuration d'ordre supérieur (cellule eucaryote ou être pluricellulaire) cette hypothèse ne tient plus. Une cellule constituée d'organites internes (eucaryote) se reproduit en organisant la duplication de certains de ses organites internes, notamment du noyau qui contient le matériel génétique. La biologie moderne sait comment ce phénomène se déroule, mais ne dit quasiment rien du déterminisme de son déclenchement. De la même façon, qu'est-ce qui, dans un être vivant pluricellulaire à reproduction sexuée, déclenche en lui le comportement visant à faire se rencontrer des gamètes (cellules sexuelles) dont la fusion (œuf, cellule souche) aboutira via le développement embryonnaire à un nouvel être vivant ? Là aussi, nous savons quasiment tout du « comment » et quasiment rien du « pourquoi ».

Un système chimique prébiotique reproduit la molécule initiale, et un être vivant reproduit son patrimoine génétique, ou une moitié de son patrimoine si la reproduction est sexuée. C'est à partir de cette information reproduite que d'autres corps vont pouvoir se développer et poursuivre le processus, ce qui n'est rien d'autre que la vie. En cela, l'information dont nous parlons, celle par laquelle le « tout » est initié, devient embryon et se développe, est pleinement d'ordre génétique. Le système chimique prébiotique dispose de son information génétique même si elle est plus simple que celle d'un être vivant (cellule ou être pluricellulaire organisé).

La reproduction, c'est-à-dire la transmission intergénérationnelle de l'information génétique est donc bien au cœur de la structuration biologique de la matière (**Figure 1.4**). À la différence de tous les phénomènes physiques structurants que j'ai précédemment passés en revue, il est le seul à reproduire une information dont il est directement issu. Ce faisant, et pour le plus grand bénéfice de la vie, cette information reproduite peut subir des aléas et se modifier légèrement d'une génération à l'autre au travers de mutations imprévisibles. Si ces mutations donnent un avantage aux corps qui les portent, systèmes chimiques prébiotiques ou êtres vivants, alors leur transmission intergénérationnelle en sera renforcée. Si, au contraire, elles sont néfastes, la population de leurs porteurs décroîtra puis disparaîtra. Au final, seule l'information génétique favorable sera retenue. Cette capacité de sélectionner naturellement l'information génétique est le fondement de la théorie de l'évolution. Celle-ci fut d'abord proposée séparément par Charles Darwin et par Alfred Russel Wallace dans les années 1850, avant même que ne soient connues les lois de l'hérédité découvertes par Gregor Mendel à la même période, et que ne soit découverte la structure hélicoïdale de l'ADN, le support moléculaire de l'information génétique des êtres vivants actuels, par Francis Crick et James Watson un siècle plus tard, dans les années 1960. Darwin et Wallace évoquèrent donc, chacun à leur manière, une évolution des espèces par un mécanisme de sélection naturelle, mais sans trop savoir sur quelle base reposait l'hérédité des êtres vivants.

L'existence ou l'absence d'un gène, ou d'une séquence de gènes, est une information génétique déterminante pour la compréhension des mécanismes évolutifs. Toutefois, depuis quelques dizaines d'années, la science a découvert que certains gènes pouvaient se trouver dans un état activé ou inhibé en fonction des conditions physico-chimiques ou biologiques de leur environnement. En d'autres termes, le gène, dont le rôle est de contrôler la fabrication de protéines qui

interviennent dans le métabolisme d'une cellule ou d'un individu multicellulaire, peut ou non s'exprimer. Si un gène se trouve inhibé par des conditions environnementales pendant la durée de plusieurs générations d'individus, une sélection naturelle peut intervenir à patrimoine génétique constant, sans qu'aucune mutation n'intervienne. Dans ce cas, ce n'est pas l'information de l'existence du gène qui est déterminante mais celle de son état d'activation ou d'inhibition. Cette découverte a ouvert un thème de recherche majeur depuis la fin du XX^e^ siècle, que l'on appelle l'épigénétique.

Les mécanismes épigénétiques interviennent donc largement, eux-aussi, dans l'évolution des espèces et la structuration de la matière vivante. Leur compréhension a permis de moduler l'interprétation génétique exclusive de la sélection naturelle. Elle réhabilite un peu le mécanisme de l'hérédité des caractères acquis proposé par Lamarck au début du XVIII^e^ siècle et que Darwin avait écarté. Enfin, elle permet de mieux comprendre les mécanismes du développement embryonnaire au travers desquelles les cellules d'un individu évoluent, sont naturellement sélectionnées, et se spécialisent pour constituer les organes fonctionnels.

Nous voyons à quel point, en ouvrant le champ des possibilités de l'évolution biologique, l'émergence de la vie terrestre fut une étape majeure de la structuration de la matière. Nos références nous portent le plus souvent à évoquer les morphologies animales qui ont marqué cette évolution, celles des arthropodes du Cambrien il a 500 millions d'années, puis des dinosaures du Jurassique, puis des mammouths du Quaternaire... Mais la vie a émergé bien avant cela, il y a plus de 3,8 milliards d'années, et des évolutions biologiques majeures, quoique plus discrètes, se sont produites bien avant le Cambrien. C'est l'avènement de la photosynthèse, celle de la respiration, celle de la cellule symbiotique, dite eucaryote, et celle des êtres multicellulaires. Toutes ces innovations évolutives ont mis en interaction la matière non vivante et la matière vivante. La photosynthèse produit et accumule de l'oxygène dans l'environnement. Celui-ci est toxique mais les espèces se sont adaptées pour s'en protéger et pour en tirer un avantage énergétique par la respiration. Chez les êtres vivants multicellulaires, l'organisation a évolué de telle façon que des groupes de cellules se sont spécialisés dans la protection contre l'oxygène, les enveloppes, les cuticules, la peau, d'autres dans la capture de l'oxygène, les poumons et les globules rouges, d'autres dans le transport vasculaire, les artères et les veines, d'autres enfin dans l'utilisation de l'oxygène aux fins de fonctions motrices, les muscles, ou de fonctions cérébrales, les nerfs et le cerveau.

Finalement, dans la structuration avancée de la matière terrestre, nous avons échappé à la grande extinction qui aurait été provoquée par une accumulation excessive d'oxygène, rendant la Terre inhabitable. Ceci a été permis par la formidable plasticité de l'évolution biologique.

Par la photosynthèse, les espèces ont su mobiliser l'énergie la plus disponible, celle du soleil. Elles ont su parallèlement se protéger de l'oxygène produit par la photosynthèse, et l'utiliser en respirant, limitant ainsi une oxygénation excessive de l'environnement. Le monde terrestre dans lequel nous vivons est le résultat stationnaire de ces évolutions très anciennes, où la photosynthèse et la respiration se compensent. Ce monde aurait été inhabitable pour les premiers êtres vivants qui ne supportaient aucune présence d'oxygène. Et nous n'aurions pu vivre dans le monde dépourvu d'oxygène d'il y a 4 milliards d'années. Entre l'émergence de la vie et maintenant, une très longue coévolution du vivant et du non vivant, fondée sur la plasticité de l'évolution biologique, a toujours maintenu l'habitabilité de la planète en adaptant les nouvelles espèces aux modifications environnementales créées par la vie elle-même.

C'est surtout en cela que la Terre actuelle représente l'état de structuration de la matière le plus avancé, un état évolutif et adaptatif, fondé sur l'existence d'une information génétique qui se transmet avec des variations. Il a fallu l'acquis de toute l'histoire cosmique et tellurique antérieure, ainsi que l'émergence et l'ancrage de la vie sur la Terre pour en arriver là.

À cette structuration biologique essentielle de la matière, qui donne au système Terrestre une grande plasticité adaptative, il faut encore ajouter la structure des populations et des écosystèmes, celles des groupes sociaux, qui chez les humains peuvent prendre un caractère culturel et religieux, et, toujours chez les humains, les structures économiques et techniques. Mais ces structurations-là sont secondaires car elles ne sont que des formes particulières de l'évolution biologique. Néanmoins elles entrent dans la dynamique évolutive et, comme les espèces, leur destin dépendra de leur capacité à s'adapter.

Peut-on imaginer un mode de structuration de la matière encore plus sophistiqué, tout en restant aussi essentiel ? Il a fallu 9,3 milliards d'années d'histoire cosmique pour aboutir à la diversité chimique nécessaire, puis 500 millions d'années d'histoire tellurique pour préparer le berceau terrestre, puis 3,6 milliards d'années d'histoire évolutive de la vie et des milieux de vie pour maintenir l'habitabilité de notre planète

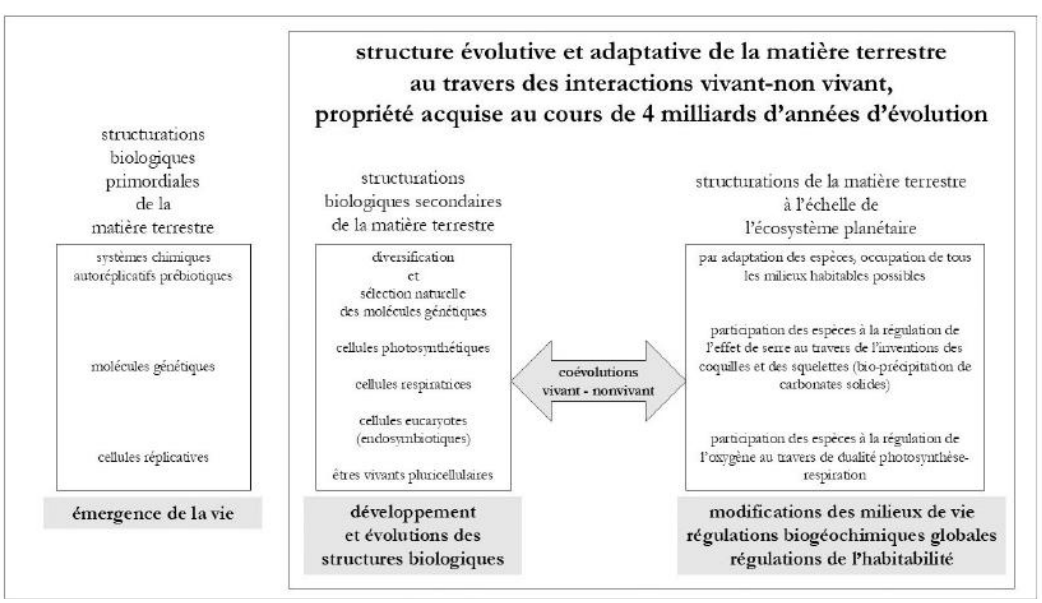
et s'approcher de sa régulation globale. J'ai tendance à penser que la nature a fait le maximum et que nous devons modestement apprécier de faire partie de ce concert merveilleux.

10. Qu'appelle-t-on les cycles de matière ?

La structuration de la matière ne se traduit pas par une organisation figée. Chaque particule de matière, fusse-t-elle la plus infime, peut passer d'une structure à l'autre au prix d'une certaine quantité d'énergie. Évidemment, l'interaction nucléaire forte, celle qui lie des quarks, garantit la stabilité des protons et des neutrons. Fort heureusement pour nous ! Et ces derniers sont aussi solidement liés entre eux dans les noyaux d'atomes par l'interaction nucléaire faible. Seuls quelques noyaux très lourds sont instables et se désintègrent en donnant lieu à des rayonnements, phénomène dont la dynamique terrestre a tiré parti comme nous le verrons ultérieurement.

La rupture des interactions électromagnétiques, chimiques et gravitaires de la matière demande moins d'énergie que celles des interactions nucléaires. Un atome peut ainsi plus facilement passer d'une structure moléculaire ou macroscopique à une autre qu'un proton ou un neutron d'un noyau à un autre noyau.

L'émergence de la vie, il y a environ 4 milliards d'années signa le début de la structuration biologique de la matière. Celle-ci se traduisit à la fois par une structuration moléculaire, dont celle qui porte l'information génétique, et par la structuration macroscopique des premiers êtres vivants unicellulaires (colonne de gauche). Comme l'information génétique peut, aléatoirement, être légèrement modifiée d'une génération d'êtres vivants à une autre, certains individus sont avantagés pour leur survie et leur reproduction alors que d'autres sont au contraire désavantagés. C'est la sélection naturelle par laquelle les espèces évoluent peu à peu en favorisant les individus dont le patrimoine génétique est le plus favorable face aux milieux de vie et aux autres espèces, au point parfois de diverger (création de nouvelles espèces, sans lien de fécondité entre elles) ou de disparaître (extinction naturelle). Cette évolution conduisit à des métabolismes bioénergétiques différents (photosynthèse, respirations) et à des formes de vie pluricellulaires (colonne centrale). Au final, la diversité évolutive des êtres vivants a permis à la vie de coloniser une grande partie de la planète, au point d'interagir avec les milieux de vie par transferts de matière, et de continuer à évoluer face à des conditions qu'elle avait elle-même contribué à créer. Cette situation de coévolution du vivant et du non vivant, par laquelle notre planète régule son habitabilité en modifiant ses habitants, est l'une de ses caractéristiques majeures depuis les débuts de la vie terrestre (colonne centrale et colonne de droite). Elle n'a été possible qu'au travers d'une exceptionnelle structuration de la matière, dont la Terre est encore, à notre connaissance, le seul exemple dans l'Univers.


structure évolutive et adaptative de la matière terrestre
au travers des interactions vivant-non vivant,
propriété acquise au cours de 4 milliards d'années d'évolution
structurations biologiques primordiales de la matière terrestre
systèmes chimiques autoréplicatifs prébiotiques
molécules génétiques
cellules réplicatives
émergence de la vie
structurations biologiques secondaires de la matière terrestre
diversification et sélection naturelle des molécules génétiques
cellules photosynthétiques
cellules respiratrices
cellules eucaryotes (endosymbiotiques)
êtres vivants pluricellulaires
développement et évolutions des structures biologiques
coévolutions vivant - nonvivant
structurations de la matière terrestre à l'échelle de l'écosystème planétaire
par adaptation des espèces, occupation de tous les milieux habitables possibles
participation des espèces à la régulation de l'effet de serre au travers de l'inventions des coquilles et des squelettes (bio-précipitation de carbonates solides)
participation des espèces à la régulation de l'oxygène au travers de dualité photosynthèse-respiration
modifications des milieux de vie régulations biogéochimiques globales régulations de l'habitabilité

Suivons par exemple ce que pourrait être le parcours d'un atome de carbone dans le dédale de la structure terrestre de la matière (**Figure 1.5**) !

Dans l'atmosphère terrestre, un atome de carbone est lié à deux atomes d'oxygène avec lesquels il forme la molécule de dioxyde de carbone (le gaz carbonique CO_2). Les conditions de pression amènent parfois la molécule de CO_2 à se dissoudre dans l'océan où le carbone peut alors se distribuer sous plusieurs autres formes moléculaires. Deux d'entre elles, la forme bicarbonate (HCO_3^-) et la forme carbonate (CO_3^{2-}), qui portent des charges électriques négatives, peuvent se lier électriquement à des atomes métalliques dissous comme ceux du calcium, du magnésium ou du fer, porteurs de charges électriques positives. Dans certaines conditions de concentration, le carbone sous forme de bicarbonate ou de carbonate peut donc quitter l'état dissous pour former un matériau solide, par exemple le carbonate de calcium (calcaire). Il peut ainsi rester des millions d'années au fond des océans, ou se redissoudre puis revenir à l'état solide. Les mouvements tectoniques de la croûte terrestre entraînent les sédiments, dont les bicarbonates et les carbonates solides, et l'eau qu'ils contiennent vers les profondeurs de la Terre interne, et les intègrent dans un magma brûlant et visqueux. C'est ce qui se passe dans certaines zones de Terre, très sujettes aux séismes, comme la façade ouest de l'Amérique du Sud, la façade indienne de Sumatra, ou les façades est du Japon et des Philippines. Il est ensuite possible que, plus tard, ce magma ramène le carbone vers la surface à la faveur d'une éruption volcanique et que celui-ci rejoigne l'atmosphère sous sa forme primordiale, celle du gaz carbonique. Le long cycle du voyage géologique du carbone sera alors bouclé.

Mais le destin du carbone peut aussi être une incorporation à la matière vivante par le biais de la photosynthèse. Le carbone passe alors d'un organisme vivant à un autre au travers des échanges de matière entre végétaux et herbivores, entre proies et prédateurs, et entre bactéries et cadavres. Il peut contribuer à la fabrication des coquilles et des squelettes. Il peut enfin être rejeté vers l'atmosphère par la respiration. Ce destin-là, celui du cycle biologique, est beaucoup plus court que le précédent. Il ne dure que quelques siècles au plus, au bout desquels le carbone rejoint inéluctablement le cycle géologique de la matière.

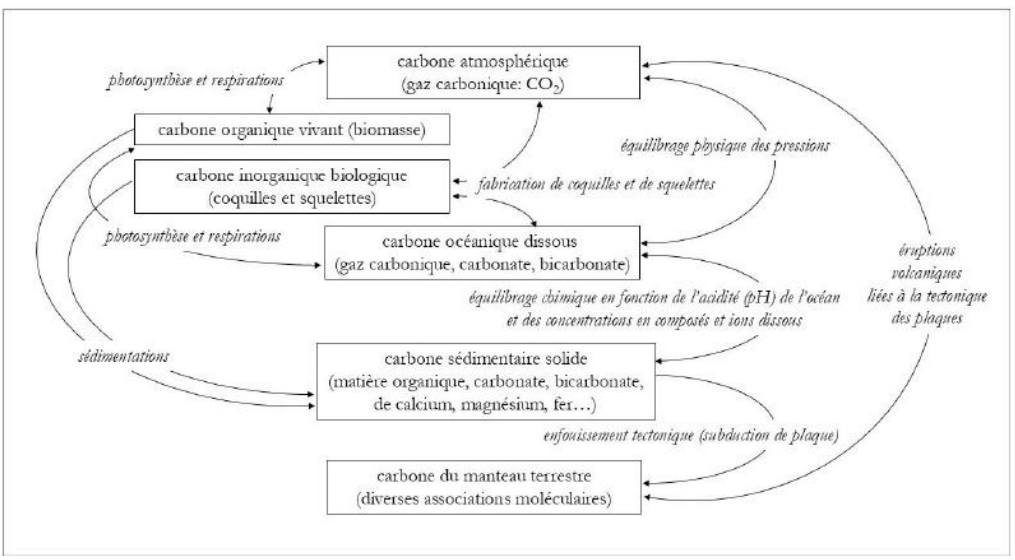
De multiples autres exemples d'échanges de matière peuvent être donnés. Contentons-nous de celui – oh combien important ! – de l'hydrogène et du cycle de l'eau, auquel l'habitabilité de la Terre doit tant !

Lorsque 2 atomes d'hydrogène sont liés à un atome d'oxygène, ils forment la molécule d'eau (H_2O). Sous cette forme, l'hydrogène est le plus souvent présent dans les océans terrestres, mais il se promène aussi parfois dans l'atmosphère sous forme gazeuse. S'il s'aventure dans la haute atmosphère, des rayonnements solaires peuvent rompre les liens chimiques de la molécule d'eau, et il peut alors se retrouver seul. L'hydrogène est l'élément chimique le plus léger car son noyau n'est constitué que d'un proton. Si léger, qu'il est très peu retenu à la Terre par l'attraction gravitaire ! Au fil de ses mouvements désordonnés, il peut même échapper à l'attraction terrestre et partir définitivement vers l'espace. C'est en perdant ainsi de l'hydrogène que beaucoup de planètes ont aussi perdu, peu à peu, leur stock d'eau.

Mais le voyage d'un atome d'hydrogène dans une molécule d'eau sur la Terre est bien plus enthousiasmant qu'un voyage seul dans l'espace. Il peut passer des océans à l'atmosphère et s'y transformer en gouttes de pluie, puis s'insérer dans les cellules bactériennes, végétales ou animales. Il peut descendre les torrents, les rivières et les fleuves et rejoindre l'océan dont il est parti. Il peut aussi participer à la lente circulation de nappes phréatiques, superficielles et profondes.

Et les échanges entre l'état liquide et l'état gazeux de l'eau ne sont pas les seuls possibles. L'atome d'hydrogène de l'eau peut aussi connaître des transitions vers l'état solide, celui de la neige et de la glace. Sous cet état, il peut suivre le lent mouvement des glaciers et partir à la dérive dans un iceberg. À l'approche de l'hiver, il peut aussi former la banquise des océans polaires, puis en connaître la débâcle au printemps. Enfin, engagé dans l'eau qui remplit la porosité des sédiments marins profonds, il peut connaître le même destin que l'atome de carbone et rejoindre le manteau terrestre. Il y modifie alors les conditions chimiques et rend possible la formation d'une croûte continentale, plus légère que la croûte océanique, et sans laquelle les continents terrestres n'auraient jamais existé.

La structuration de la matière terrestre est fortement dynamique au sens où, à l'instar du carbone, les éléments chimiques passent fréquemment d'un compartiment à un autre. Ces passages peuvent être très rapides, comme au sein de la matière vivante, ou entre les états physiques gazeux, liquide et solide. Ils peuvent aussi se produire sur des échelles de temps séculaires et millénaires, voire géologiques (millions d'années), par exemple sous l'influence de la sédimentation, de l'érosion et de la tectonique des plaques.


carbone atmosphérique
(gaz carbonique: CO_2)
photosynthèse et respirations
carbone organique vivant (biomasse)
carbone inorganique biologique
(coquilles et squelettes)
équilibrage physique des pressions
fabrication de coquilles et de squelettes
photosynthèse et respirations
carbone océanique dissous
(gaz carbonique, carbonate, bicarbonate)
éruptions volcaniques liées à la tectonique des plaques
équilibrage chimique en fonction de l'acidité (pH) de l'océan et des concentrations en composés et ions dissous
sédimentations
carbone sédimentaire solide
(matière organique, carbonate, bicarbonate, de calcium, magnésium, fer…)
enfouissement tectonique (subduction de plaque)
carbone du manteau terrestre
(diverses associations moléculaires)

La structuration de la matière terrestre est donc fortement dynamique au sens où les éléments chimiques passent fréquemment d'un compartiment à un autre. Ces passages peuvent être très rapides, comme au sein de la matière vivante, ou entre les états physiques gazeux, liquide et solide. Ils peuvent aussi se produire sur des échelles de temps séculaires et millénaires, voire géologiques (millions d'années), par exemple sous l'influence de la sédimentation, de l'érosion et de la tectonique des plaques. La Terre intègre toutes ces échelles de temps et se comporte comme un système complexe dynamique dont certains aspects sont pseudo-stationnaires, c'est-à-dire naturellement régulés à l'échelle de temps qui les concerne. À l'échelle de quelques siècles ou milliers d'années, c'est le cas de la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique, donc de l'effet de serre, même si des perturbations ultrarapides, comme l'actuel impact de l'activité humaine, peuvent venir gêner temporairement cette régulation. La teneur en oxygène de l'atmosphère est probablement régulée sur une échelle de temps plus longue, de l'ordre de quelques dizaines ou centaines de milliers d'années. Le principe global en est simple même si le détail des mécanismes biologiques en cause est complexe. L'oxygène étant un élément chimique hautement instable et réactif, sa teneur atmosphérique ne peut être que le résultat stationnaire des phénomènes biologiques qui le produisent, notamment la photosynthèse, et des phénomènes biologiques qui le consomment directement, comme la respiration de l'oxygène lui-même, ou indirectement comme les respirations de différents composés, tels les sulfates ou les nitrates, dont la régénération dépend de l'oxygène. Un éventuel excès d'oxygène dans les milieux de vie favorise la respiration par rapport à la photosynthèse, c'est-à-dire la consommation d'oxygène par rapport à sa production, alors que, inversement, un éventuel déficit d'oxygène la défavorise, ce qui aboutit à favoriser relativement la production d'oxygène par rapport à sa consommation. Mais parallèlement, les populations qui respirent sont limitées par leurs ressources nutritives primaires, c'est-à-dire par la production photosynthétique. La réponse des écosystèmes terrestres à l'un ou l'autre de ces déséquilibres, et l'éventuelle régulation de l'oxygénation globale est donc un mécanisme complexe qui fait intervenir de multiples rétroactions (parfois appelées boucles d'autoréférence), sur lequel je reviendrai. Cette réponse prend le temps nécessaire à certaines modifications des populations et des peuplements, voire à certaines modifications évolutives des espèces. La régulation de l'oxygène se réalise donc sur des échelles de temps de quelques milliers d'années ou davantage. Il convient de dire ici que ces deux grands métabolismes ne sont pas seuls en cause. Un

très grand excès d'oxygène conduit aussi à des conditions physico-chimiques où les incendies de végétation sont favorisés. Ceux-ci consomment par là une partie de l'oxygène en excès, comme le fait la respiration, mais de façon abiotique (non biologique). En cela, ils contribuent aussi à la régulation de l'oxygène.

11. La structuration fractale et dynamique de la matière terrestre

Le système Terre comporte d'innombrables éléments, vivants et non vivants, qui interagissent les uns avec les autres à différentes échelles de temps et d'espace.

Les éléments non vivants, comme l'atmosphère, l'océan ou le manteau, interagissent entre eux en raison de phénomènes physiques, chimiques et géophysiques. Les premiers sont des mouvements des milieux fluides (courants atmosphériques et marins, vagues, marées, tourbillons, turbulences, convections de l'air, de l'eau ou du magma, vents, tornades, tempêtes, cyclones), des passages de la matière d'un état à un autre (évaporation et précipitations, fontes et solidifications), et des dispersions de la matière dans les milieux fluides (diffusion). Les seconds induisent des changements de forme chimique lorsque des atomes ou des composés d'atomes se rencontrent et sont susceptibles de réagir chimiquement. Les troisièmes enfin sont des effets dynamiques de la tectonique des plaques (volcanismes, séismes, élévation des reliefs, érosion). Mais les éléments non vivants interagissent aussi avec les éléments vivants (cellules individuelles ou êtres vivants pluricellulaires) en fournissant à ceux-ci leurs milieux de vie et leurs ressources nutritives primaires (sels nutritifs et eau pour la photosynthèse).

Les êtres vivants interagissent entre eux au travers de l'alimentation (réseaux trophiques), de la reproduction, du parasitisme, des symbioses, des comportements territoriaux et culturels. Mais ils interagissent aussi avec les éléments non vivants au travers de leurs métabolismes bioénergétiques (photosynthèse, respirations) ou fonctionnels (bio-minéralisation, constructions de coquilles ou et squelettes). Certains êtres vivants sont eux-mêmes constitués d'organes qui interagissent entre eux au travers des systèmes digestifs, vasculaires et neuronaux. Et ces organes sont eux-mêmes constitués de cellules spécialisées (somatiques) qui interagissent entre elles. Et, bien sûr, chacune de ces cellules contient des organites (noyaux, mitochondries, chloroplastes…) qui interagissent entre eux.

Dans toute cellule vivante, au niveau moléculaire, l'ADN est la matrice à partir de laquelle l'ARN de transfert est produit, et celui-ci gère la production des protéines qui assurent le métabolisme cellulaire. Dans l'ADN, les séquences génétiques peuvent interagir indirectement entre elles car certaines protéines, dites chaperonnes, sont capables d'inhiber l'activation (ou expression) de certains gènes. De plus, l'ADN se réplique lors de la reproduction de la cellule en transférant aux générations cellulaires descendantes les propriétés génétiques de la cellule mère avec d'éventuelles mutations. Les caractères mutés sont soumis à la sélection naturelle et, s'ils sont favorables, ils s'installent comme nouveaux caractères de la population cellulaire. Chez les êtres vivants pluricellulaires, les mutations de l'ADN peuvent déterminer des caractères macroscopiques qui donnent ou non un avantage à leurs porteurs dans la sélection naturelle. Au final, aucun être vivant n'est sélectionné, mais c'est sa descendance, porteuse d'une information génétique modifiée, qui l'est.

Finalement, on réalise que le système Terre est un système de type poupée gigogne, c'est-à-dire dont la structure collective est fractale (**Figure 1.6**), mais avec la dynamique des interactions en plus. À chaque niveau, des éléments interagissent horizontalement entre eux, mais des interactions verticales existent, depuis le niveau moléculaire jusqu'au niveau des grands compartiments physiques de la planète.

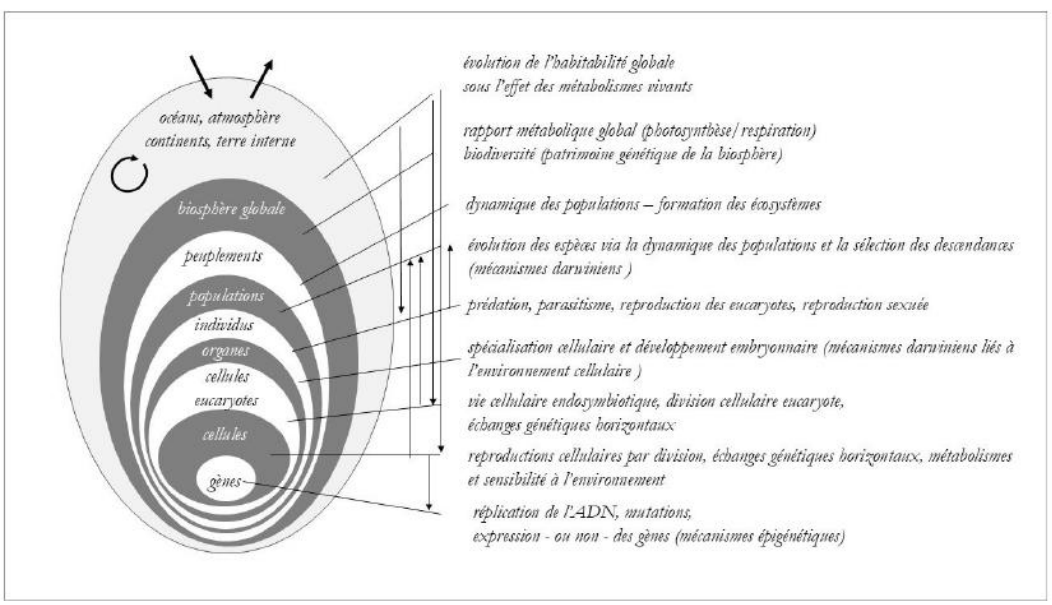
Cette structure fractale dynamique s'est progressivement mise en place au cours de l'évolution biologique. La dernière étape fut probablement l'émergence des êtres vivants pluricellulaires, dont la date reste l'objet de vives discussions scientifiques (environ 1 milliard d'années, ou plus de 2 milliards d'années selon l'interprétation que l'on donne à certains fossiles trouvés au Gabon).

Qu'est-ce qu'une structure fractale ?

La notion de structure fractale a été découverte par Georg Cantor en 1883 et très étudiée par la suite, notamment par Benoît Mandelbrot dans les années 1950-1970. Elle a été théorisée par le concept d'invariance d'échelle, c'est-à-dire par le fait que, quelle que soit l'échelle à laquelle on observe un objet, certaines caractéristiques se retrouvent. En pratique, cette notion nous dit par exemple que notre mesure de la longueur d'une courbe, ou de l'aire d'une surface, augmente au fur et à mesure qu'augmente notre capacité de visualiser précisément une sinuosité ou une topographie, soit avec nos moyens

d'observations directs (nos yeux, éventuellement assistés d'instruments optiques), soit en faisant appel à des cartes géographiques d'échelle croissante. Il en ressort que la dimension fractale d'une courbe très sinueuse est comprise entre 1 (dimension fractale d'une courbe non sinueuse) et 2 (dimension fractale d'une surface). De la même façon, une surface très accidentée a une dimension fractale comprise entre 2 (dimension fractale d'une surface à courbure constante) et 3 (dimension fractale d'un volume). La dimension fractale du littoral breton est environ 1,30, celle du littoral norvégien est 1,52, celle de l'ensemble du littoral de l'Europe occidentale est 1,24. Les littoraux très linéaires, comme les plages landaises, ont une dimension fractale à peine supérieure à 1. Cette notion peut être étendue à toute forme de structure s'exerçant dans plusieurs dimensions. C'est pourquoi j'ai l'audace de l'utiliser ici pour caractériser qualitativement la structuration de la matière terrestre même si la quantification n'est évidemment pas possible.

Le système Terre est un système dynamique hiérarchisé fractal, mis en place au cours de l'évolution biologique, liant les gènes à l'environnement global au travers de différents niveaux d'échelles, à la manière d'un emboîtement de poupées russes (Matriochka ou petite mère). Les différents niveaux structurels interagissent entre eux, soit à niveau équivalent, soit entre les niveaux d'échelle au travers des phénomènes biologiques, incluant ceux de la sélection naturelle. Cette structure confère donc à l'ensemble une remarquable plasticité adaptative puisque toutes les entités biologiques interagissent avec leurs milieux de vie.


océans, atmosphère
continents, terre interne
biosphère globale
peuplements
populations
individus
organes
cellules
eucaryotes
cellules
gènes
évolution de l'habitabilité globale
sous l'effet des métabolismes vivants
rapport métabolique global (photosynthèse/ respiration)
biodiversité (patrimoine génétique de la biosphère)
dynamique des populations – formation des écosystèmes
évolution des espèces via la dynamique des populations et la sélection des descendances
(mécanismes darwiniens)
prédation, parasitisme, reproduction des eucaryotes, reproduction sexuée
spécialisation cellulaire et développement embryonnaire (mécanismes darwiniens liés à
l'environnement cellulaire)
vie cellulaire endosymbiotique, division cellulaire eucaryote,
échanges génétiques horizontaux
reproductions cellulaires par division, échanges génétiques horizontaux, métabolismes
et sensibilité à l'environnement
réplication de l'ADN, mutations,
expression - ou non - des gènes (mécanismes épigénétiques)

12. Une structuration porteuse et gardienne de l'information

La structuration terrestre de la matière est bien la plus avancée que nous connaissons ! Au-delà de la diversité chimique engendrée par l'histoire cosmique, elle se traduit par des formes macroscopiques très diversifiées de matière non vivante, solides, liquides ou gazeuses, et de matière vivante. Toutes ces entités macroscopiques résultent de phénomènes telluriques ou biologiques, et échangent entre elles de la matière sous la contrainte des lois physiques et biologiques fondamentales.

Mais la structuration de la matière terrestre se traduit aussi par l'existence d'entités microscopiques, cellulaires, cristallines et moléculaires.

Certaines des entités macroscopiques, les êtres vivants, contiennent des entités microscopiques porteuses d'une information génétique, par laquelle elles peuvent se développer à partir de la génération précédente, tout en se modifiant. Les entités macroscopiques et microscopiques échangent donc aussi de l'information au travers de la reproduction biologique. De génération en génération, c'est-à-dire avec le temps, la sélection naturelle ne retient de l'information génétique que celle qui est la mieux adaptée à la survie et à la reproduction des êtres vivants, que ce soit face aux autres êtres vivants ou face aux modifications de l'environnement. Cette formidable propriété, celle de la plasticité évolutive de l'information génétique à l'échelle du temps géologique, s'étend à l'ensemble du système Terrestre car les êtres vivants interagissent par échanges de matière avec leurs milieux de vie, les subissent et les modifient, et adaptent en retour le patrimoine génétique des espèces.

La Terre est ainsi une entité globale, systémique et fractale qui, au travers de multiples interactions et rétroactions (ou boucles d'autoréférence), adapte en permanence les habitants à l'habitabilité, et réciproquement. Comme le fondement de cette régulation est génétique, on peut dire que la plasticité évolutive de la Terre est, elle-aussi, génétique. La Terre n'est pas un être vivant au sens où elle n'a pas de descendance, mais certaines de ses propriétés globales sont étroitement liées à l'existence d'une structuration génétique et adaptative de la matière terrestre.

13. La Terre, un tableau à la fois universel et unique

La structuration terrestre de la matière résulte de la longue histoire de l'Univers, de celle de la formation du système solaire, de celle de la formation de la Terre, et enfin de celle de l'évolution de la Terre sans, puis avec, la vie. Dans ces histoires, les propriétés combinatoires de l'énergie et de la matière ont joué un rôle déterminant. Mais, comme Paul Cézanne peignant des dizaines de fois la Montagne Sainte Victoire, la nature temporelle et complexe peut induire des variations au travers de la contingence et du hasard des chaînes de causalité historiques. La Terre est à la fois universelle dans son essence fondamentale, et unique dans ses formes et ses couleurs. Pour les dinosaures comme pour les humains, l'histoire a commencé par « il fut une seule fois », elle ne s'est pas produite et ne se reproduira pas sur d'autres mondes. Mais, il est probable que des propriétés biologiques majeures comme la photosynthèse ou la respiration de l'oxygène, partagées par beaucoup d'êtres vivants terrestres, y compris de simples bactéries, soient d'essence universelle parce qu'elles sont davantage liées aux propriétés combinatoires de la matière, et puissent donc être retrouvées ailleurs dans l'Univers. C'est pour cette raison que la présence d'oxygène est l'un des indices majeurs que les astrophysiciens essayent de détecter dans l'atmosphère des exoplanètes.

13,8 milliards d'années après le Big Bang, la nécessité et le hasard ont produit une autopoïèse, c'est-à-dire une forme très avancée, de la structuration de la matière et de l'énergie dans l'Univers, dont nos modestes connaissances ne nous font percevoir qu'une part infime de la beauté. Mais elles nous font pourtant réaliser que ce système est l'unique vaisseau cosmique habitable dont l'humanité dispose puisque l'habitabilité de la Terre et l'adaptation sont indissociables (ou autoréférentes), pour l'espèce humaine comme pour toutes les autres. C'est ce qu'aborde le chapitre suivant.

Qu'est-ce qu'une autopoïèse ?

Le concept d'autopoïèse a été inventé par Humberto Maturana et Francisco Varela, biologistes chiliens. L'autopoïèse est la propriété d'un système de se produire lui-même en interaction avec son environnement, et de maintenir son organisation (sa structure) en compensant en permanence des perturbations externes qu'il subit. C'est un concept qui est notamment utilisé dans les domaines des neurosciences, de la sociologie et de l'intelligence artificielle.

Selon Francisco Varela (*Autonomie et connaissance*, éditions Seuil, 1989) « *Un système autopoïétique est organisé comme un réseau de processus de production de composants qui régénèrent continuellement par leurs transformations et leurs interactions le réseau qui les a produits, et qui constituent le système en tant qu'unité concrète dans l'espace où il existe, en spécifiant le domaine topologique où il se réalise comme réseau.* »

CHAPITRE 2

Vers l'habitabilité

1. Préambule sur les habitants et l'habitabilité

Ceux que nous considérons comme les habitants de la Terre, c'est-à-dire tous les êtres vivants qu'elle a portés depuis 4 milliards d'années, sont en fait, sans exception, des entités constitutives issues des émergences évolutives du système Terre, et qui y ont joué, et continuent d'y jouer, un rôle important. Le système Terre n'a en réalité, jusqu'à présent, aucun habitant externe installé, c'est-à-dire qui ne soit pas issu de lui-même et qui ne fasse pas partie de ses éléments constitutifs. Réciproquement, les êtres vivants de la Terre n'auraient réellement le statut d'habitants externes installés que sur une planète qui ne les aurait pas enfantés, en supposant qu'ils réussissent à l'atteindre et à la coloniser. Les mots habitabilité et habitants ne sont donc ici que des facilités de langages que j'utilise en raison de l'énorme usage qui en a déjà été fait. Les termes de « fertilité », et d'« êtres vivants constitutifs » en tant que fruits biologiques permis par cette fertilité, seraient finalement mieux appropriés.

2. La Terre primitive était inhabitable

À la fin de sa formation, il y a environ 4,5 milliards d'années, la Terre n'était pas habitable. L'atmosphère initiale était des dizaines de fois plus dense que l'atmosphère actuelle, son composant principal était le gaz carbonique. Cette atmosphère ressemblait à celle de l'actuelle Vénus où, en raison d'un effet de serre monstrueux, la température au sol est proche de 500 °C.

Certes les conditions physiques de la formation de la Terre avaient déjà placé son orbite à une distance du soleil où, potentiellement, l'eau peut être liquide, à l'intérieur de ce que l'on appelle la zone cosmique habitable.

Certes, les mêmes conditions de formation de la Terre lui avaient déjà conféré des propriétés de rotation sur elle-même qui évitent qu'une partie de la surface terrestre soit brûlante parce que trop longtemps exposée au soleil, et qu'une autre soit glacée parce que trop longtemps dans l'ombre.

Mais ces conditions cosmiques primordiales d'habitabilité, héritées de la formation du système solaire, bien que nécessaires, ne sont toutefois pas suffisantes. En raison de l'énorme effet de serre de l'atmosphère primitive de la Terre, la vie ne pouvait s'y installer. Il fallait donc que des conditions complémentaires soient acquises avant que notre planète connaisse sa première habitabilité.

3. Le rôle fondateur précoce des premiers océans

Une centaine de millions d'années après le début de la formation du système solaire, la matière fut majoritairement intégrée dans le Soleil lui-même, ou les planètes qui se formaient autour de lui. À l'exception de quelques zones comme la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter, le disque interne initial fut ainsi nettoyé des gaz et des poussières et seuls les gros objets subsistèrent. Plus loin du soleil, d'autres zones d'objets dispersés se sont également maintenues comme la ceinture de Kuiper, au-delà de l'orbite de Neptune, et le nuage de Oort aux limites de l'attraction gravitaire du Soleil, jusqu'à environ 2 années-lumière.

Mais dans la zone interne du système solaire, à la fin de la formation de la Terre, les impacts de météorites se raréfièrent et l'énergie gravitaire libérée par ses impacts diminua. Ce faisant, la surface de la Terre commença donc à se refroidir et une croûte de roche solide se forma, probablement très entaillée par de nombreuses fractures volcaniques, siège d'une tectonique des plaques précoce.

Parallèlement, l'atmosphère primitive commença elle-aussi à se refroidir. Il y a environ 4,4 milliards d'années, seulement 100 millions après la fin de l'accrétion terrestre, la température de l'atmosphère fut suffisamment basse pour que la vapeur d'eau qu'elle contenait se condense et forme de l'eau liquide. Bien entendu, à la pression très élevée de l'atmosphère primitive, de l'eau liquide a pu commencer à se condenser à des températures qui étaient encore supérieures à 200 °C. Les conditions d'une première habitabilité n'étaient donc pas encore réunies !

Mais de l'eau liquide s'accumula déjà à certains endroits de la croûte comme l'atteste l'analyse minéralogique et géochimique de cristaux de zircons datant de cette période très ancienne, trouvés dans des roches sédimentaires australiennes. Par leurs caractéristiques, ces cristaux n'ont pu se former qu'en présence d'eau liquide.

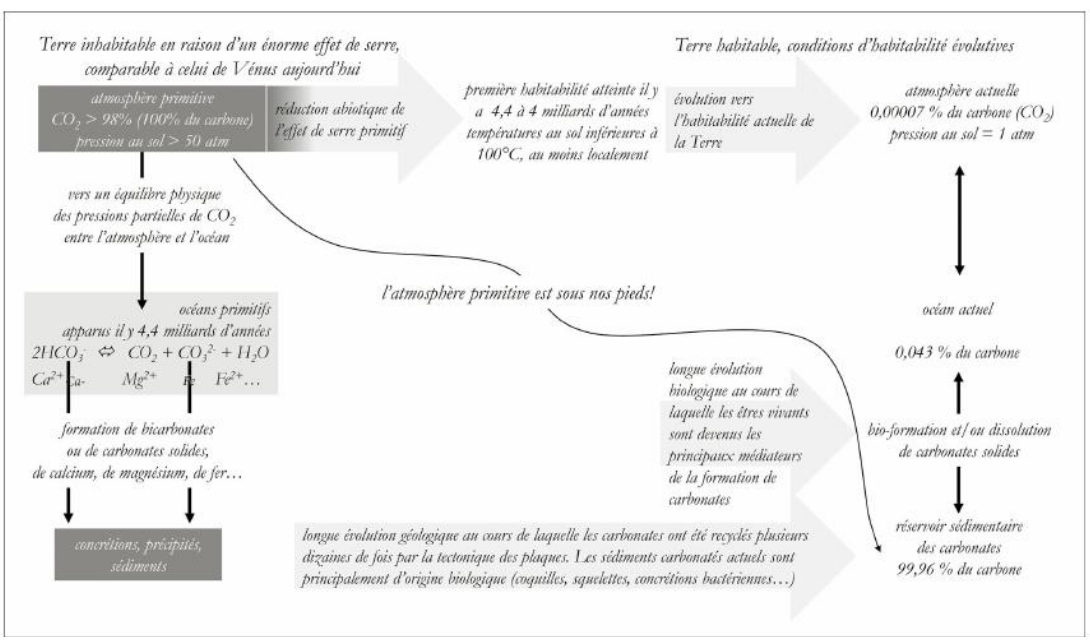
Or l'eau liquide au contact de l'atmosphère et des roches de la croûte solidifiée constitua alors un extraordinaire réacteur chimique qui permit de réduire l'énorme effet de serre primitif et de créer ainsi les conditions complémentaires nécessaires à

une première habitabilité de la Terre.

4. Les premiers océans et la réduction de l'effet de serre primitif

Dès que de l'eau liquide s'accumula à la surface de la croûte, formant de petites mares, des lacs, ou des embryons d'océans, le gaz carbonique (CO_2), composant majeur de l'atmosphère primitive, put s'y dissoudre (**Figure 2.1**). À partir d'une telle injection, le carbone se distribue en 3 formes chimiques dissoutes, le CO_2, l'ion bicarbonate (HCO_3^-) et l'ion carbonate (CO_3^{2-}). Mais l'eau liquide est également un solvant pour des ions métalliques issus de la croûte sous-jacente, comme l'ion calcium (Ca^{2+}), l'ion magnésium (Mg^{2+}), ou les ions du fer (Fe^{2+} ou Fe^{3+}). Les premières accumulations d'eau liquide, au contact de la croûte et de l'atmosphère primitive très dense, dominée par le gaz carbonique, furent donc très rapidement saturées par les ions dissous, de charge électrique négative ou positive. Or dans une telle situation, les ions quittent la phase liquide et passent en phase solide en s'associant avec des ions de charge opposée. C'est ce qui se passa et fut amplifié

Au début de son histoire la Terre était inhabitable en raison d'une atmosphère très épaisse, principalement composée de gaz carbonique. Grâce à l'apparition précoce des premiers océans, le carbone atmosphérique a été transféré vers des formes solides et l'effet de serre primitif a ainsi été réduit, aboutissant à des conditions habitables où une première forme de vie a pu émerger. La formation de matériaux carbonatés solides existe toujours sur la Terre actuelle, mais elle passe principalement par la voie biologique de fabrication de coquilles et de squelettes. Elle se trouve en outre opposée à d'éventuels mécanismes de dissolution lorsque l'océan est trop acide.


Terre inhabitable en raison d'un énorme effet de serre, comparable à celui de Vénus aujourd'hui
atmosphère primitive
CO_2 > 98% (100% du carbone)
pression au sol > 50 atm
réduction abiotique de l'effet de serre primitif
première habitabilité atteinte il y a 4,4 à 4 milliards d'années températures au sol inférieures à 100°C, au moins localement
Terre habitable, conditions d'habitabilité évolutives
évolution vers l'habitabilité actuelle de la Terre
atmosphère actuelle
0,00007 % du carbone (CO_2)
pression au sol = 1 atm
vers un équilibre physique des pressions partielles de CO_2 entre l'atmosphère et l'océan
l'atmosphère primitive est sous nos pieds!
océans primitifs
apparus il y 4,4 milliards d'années
$2HCO_3^- \Leftrightarrow CO_2 + CO_3^{2-} + H_2O$
Ca^{2+} Ca- Mg^{2+} Fe Fe^{2+}…
océan actuel
0,043 % du carbone
longue évolution biologique au cours de laquelle les êtres vivants sont devenus les principaux médiateurs de la formation de carbonates
bio-formation et/ou dissolution de carbonates solides
formation de bicarbonates ou de carbonates solides, de calcium, de magnésium, de fer…
concrétions, précipités, sédiments
longue évolution géologique au cours de laquelle les carbonates ont été recyclés plusieurs dizaines de fois par la tectonique des plaques. Les sédiments carbonatés actuels sont principalement d'origine biologique (coquilles, squelettes, concrétions bactériennes…)
réservoir sédimentaire des carbonates
99,96 % du carbone

par l'extension des premiers océans. Les ions négatifs du carbone, carbonate et bicarbonate, formèrent des matériaux solides en s'associant avec les ions métalliques positifs. Les parties submergées de la croûte terrestre se recouvrirent alors de carbonates ou de bicarbonates solides, principalement de calcium, de magnésium ou de fer. Ce n'était pas à proprement un sédiment, mais plutôt un précipité pour reprendre le terme chimique approprié. Nous verrons plus loin que ce mécanisme existe toujours dans les océans actuels, mais que les êtres vivants en sont devenus les médiateurs au travers de la fabrication des coquilles et des squelettes.

C'est ainsi que, peu à peu, l'atmosphère primitive se décarbona, que sa pression baissa, et que son effet de serre se réduisit.

Combien de temps fallut-il pour aboutir à une terre habitable ? Les avis divergent. Certains, dont je fais partie, pensent que quelques dizaines de millions d'années ont suffi et que la vie aurait très bien pu émerger sur Terre il y a 4,3 milliards d'années. D'autres pensent que plusieurs centaines de millions d'années furent nécessaires et que la première habitabilité fut atteinte il y a 4 milliards d'années au mieux. Les recherches de traces de vie nous en diront davantage. Pour l'heure, on sait que des traces de vie avérées existent dans des roches vieilles de 3,5 milliards d'années, et que des traces de vie probables existent dans des roches vieilles de 3,8 milliards d'années. Bien évidemment, si la vie terrestre existait déjà il y a 3,8 milliards d'années, son émergence est plus ancienne. Sachant que la période autour de 4 milliards d'années fut marquée par une recrudescence d'impacts météoritiques, certaines hypothèses n'excluent pas deux ou plusieurs émergences de la vie, dont certaines avant 4 milliards d'années mais dont la descendance n'aurait pu se propager au-delà de ce bombardement météoritique tardif. L'émergence de la vie dont nous sommes issus semble néanmoins s'être produite il y a au moins 3,5 milliards d'années.

5. L'océan, régulateur de l'effet de serre depuis 4 milliards d'années

L'effet de serre atmosphérique est un réchauffement de la surface terrestre, celle des océans, des glaces et des surfaces continentales. Il est dû à la composition de l'atmosphère, dont certains gaz, ou des particules d'aérosols, ont la propriété de s'opposer à la libération directe de rayonnements infrarouges, ceux de la chaleur, vers l'espace. La chaleur stagne alors plus longtemps au sol et dans l'atmosphère avant qu'elle ne soit évacuée vers l'espace, au point que les températures moyennes

du sol et de l'atmosphère s'élèvent. C'est un peu comme une voiture dotée d'un moteur qui doit évacuer de la chaleur au travers d'un radiateur et d'un circuit de refroidissement. Le moteur chauffe mais sa température finit par se stabiliser lorsque l'évacuation de chaleur équivaut à la production de chaleur. Il en est un peu de même pour la température moyenne du climat de la Terre. Celle-ci se stabilise lorsque l'évacuation de chaleur vers l'espace équivaut à sa production.

Pour être un minimum habitable, le climat de la Terre doit impérativement subir un minimum d'effet de serre. Le gaz carbonique (CO_2) n'est qu'un composant très mineur de l'atmosphère actuelle, mais s'il n'existait pas, l'effet de serre diminuerait au point que le climat se refroidirait jusqu'à une température moyenne de l'ordre de –18 °C. La Terre serait en très grande partie gelée et son habitabilité serait très faible ou nulle.

À l'inverse, lorsque la teneur en CO_2 augmente, la température moyenne du climat s'élève en raison d'un effet de serre plus fort. Dans une certaine mesure ce n'est pas trop grave. Il existe des moteurs de voiture qui sont adaptés pour fonctionner de manière optimale à 80, 90 ou 100 °C, et le climat peut lui aussi s'adapter. Les manifestations climatiques locales sont différentes mais cela ne remet pas en cause l'habitabilité générale de la planète, même si cela peut la réduire. En revanche, au-delà de certaines limites, l'adaptation climatique peut profondément altérer l'habitabilité, soit pour certaines espèces ou groupes d'espèces, soit pour l'ensemble du vivant. Ici c'est un peu comme la voiture dont le système de refroidissement connaîtrait une défaillance technique. Dans un premier temps la température du moteur s'élève, puis c'est la panne. Dans le cas du climat, la panne signifie le passage d'un seuil, c'est-à-dire une transition vers un autre mode climatique peu habitable, voire inhabitable. Un tel scénario, celui d'un emballement du changement climatique, est improbable car le système Terre dispose d'une grande capacité de résilience, y compris au travers de la disparition d'espèces proliférantes par défaut de ressources. Néanmoins, ce risque ne pouvant être totalement exclu, je le décris à la fin du chapitre 7.

L'effet de serre est donc un phénomène nécessaire à l'habitabilité de la planète, mais qui ne doit pas excéder un certain niveau. Examinons maintenant la façon dont il est, depuis au moins 4 milliards d'années, naturellement régulé sur la Terre !

Comme je l'ai évoqué précédemment, les premiers océans commencèrent à se former il y a 4,4 milliards d'années et leur effet fut d'abord de réduire l'énorme effet de serre de l'atmosphère primitive et de rendre la planète un minimum habitable. Ce

processus s'est, fort heureusement, interrompu avant que l'effet de serre devienne faible au point de transformer la Terre en une boule de glace inhabitable. Pourquoi ?

Depuis au moins 4 milliards d'années, l'essentiel du carbone atmosphérique est passé dans les océans et les roches sédimentaires carbonatées. Les océans contiennent désormais beaucoup plus de carbone que l'atmosphère, environ 65 fois plus, et les sédiments carbonatés en contiennent encore beaucoup plus, 150 000 fois plus (**Figure 2.2**). En outre, par leurs caractéristiques chimiques, les océans sont un médiateur des échanges de carbone entre sa forme gazeuse, le gaz carbonique atmosphérique, ses différentes formes dissoutes dans l'eau de mer, et ses formes solides dans les sédiments.

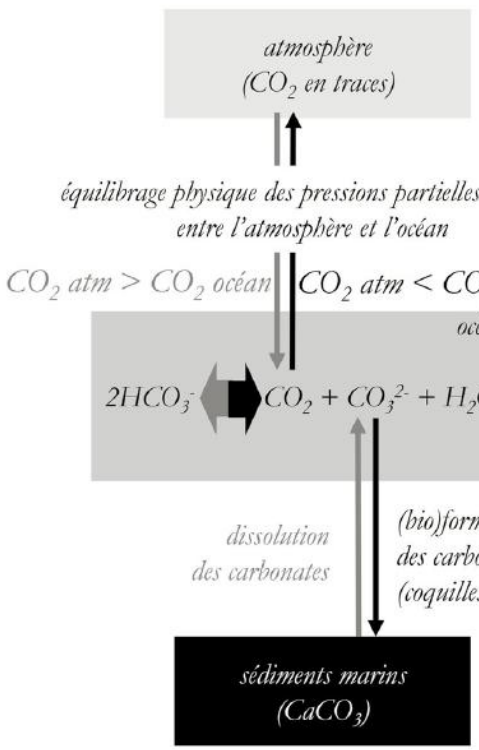
Les caractéristiques chimiques de l'océan, comme la salinité et le pH, sont extrêmement stables. Le pH moyen de l'eau de mer, c'est-à-dire la mesure de son caractère acide (valeurs inférieures à 7) ou basique (valeurs supérieures à 7), est de l'ordre de 8,1. Selon la proximité des côtes ou l'apport d'eaux continentales par les fleuves, le pH peut s'écarter localement de cette valeur moyenne et fluctuer entre 7,5 et 8,5. Il est aussi probable que, au début de l'histoire de la Terre, lorsque la teneur en CO_2 dans l'atmosphère était encore très importante, les océans aient été acides avec des pH inférieurs à 7. Mais depuis des centaines de millions d'années, le pH moyen de l'eau de mer est resté proche de sa valeur actuelle. Une telle stabilité tient au fait que les océans peuvent échanger de la matière avec les sédiments et les roches issues du manteau terrestre comme les basaltes ou les granites. Le pH est défini chimiquement comme une fonction de la concentration en ion hydrogène (H^+) de l'eau. Dans l'eau de mer, il dépend du contenu en ions dissous, positifs (cations) et négatifs (anions), et de la place que ce contenu laisse à l'ion hydrogène (H^+) pour aboutir à la neutralité électrique. Une partie de la matière dissoute sous forme d'ions s'échappe régulièrement de l'océan pour former des matériaux sédimentaires solides qui sont incorporés dans le manteau par les phénomènes de plongement d'une plaque tectonique sous une autre (subduction). Mais parallèlement, de la matière se dissout et forme de nouveaux ions dans l'eau de mer à partir des sédiments, des roches continentales, et de la nouvelle croûte océanique qui se forme dans les régions volcaniques sous-marines. Ce mécanisme de compensation semble bien être la cause majeure de la stabilité à long terme du pH de l'eau de mer, d'autant que celle-ci dispose aussi, intrinsèquement, d'un grand pouvoir tampon sur les variations de pH. En effet, les équilibres chimiques qui s'établissent à court terme entre les diverses

formes de carbone dissous (gaz carbonique, bicarbonate, carbonate), et les possibilités d'échanges de carbone avec l'atmosphère et les sédiments carbonatés amortissent les variations de pH.

Doté de ce pouvoir tampon intrinsèque, l'océan peut absorber les excès temporaires de gaz carbonique atmosphérique, ou en combler les déficits sans que ses caractéristiques soient profondément modifiées. De tels échanges répondent à la simple nécessité physique de la recherche d'un équilibre des pressions de CO_2 gazeux dans l'atmosphère et de CO_2 dissous dans l'océan. C'est une régulation à court terme. Elle s'exerce sur une échelle de temps de quelques années à quelques siècles.

Mais ceci n'est pas tout ! Puisque les océans ont aussi la possibilité d'échanger du carbone avec les sédiments qui en contiennent environ 150 000 fois plus que l'atmosphère, l'ensemble atmosphère-océan-sédiments, où les océans jouent le rôle d'un médiateur chimique planétaire, constitue un système tampon capable d'amortir des variations importantes et durables de l'effet de serre, sur des échelles de temps allant de quelques siècles à quelques milliers d'années.

L'océan est un réservoir de carbone intermédiaire entre le réservoir de carbone atmosphérique (cause de l'effet de serre) et le réservoir sédimentaire (stock principal du carbone externe de la planète). Il communique avec l'atmosphère et les sédiments au travers des équilibres chimiques stationnaires liant les différentes formes de carbone dissous (CO_2, HCO_3^-, CO_3^{2-}). La régulation répond à la nécessité physique d'équilibrer les pressions partielles de gaz carbonique entre l'atmosphère et l'océan. Compte tenu des propriétés chimiques de l'eau de mer, notamment son pH, l'océan maintient toujours une teneur minimum en gaz carbonique dans l'atmosphère, et évite par ailleurs que cette teneur soit trop importante. De ce fait, l'effet de serre terrestre reste dans une gamme compatible avec l'habitabilité thermique de la Terre. Cette régulation s'est mise en place après que l'effet de serre primitif (comparable à celui de la planète Vénus aujourd'hui) ait été réduit en raison de la formation précoce des océans terrestres (cf. Figure 2.1). C'est une régulation fondamentalement abiotique mais des organismes marins y jouent désormais un rôle important par la construction de leurs coquilles et squelettes.



pour
***1** atome de carbone dans l'atmosphère*

il y en a
***65** dans l'océan*

et
***150 000** dans les sédiments*

L'effet de serre peut, bien sûr, augmenter naturellement lorsque l'activité volcanique de la Terre émet davantage de gaz carbonique et que celui-ci s'accumule temporairement dans l'atmosphère. Dans ce cas, l'océan amortit le changement en absorbant une partie du gaz carbonique en excès, mais l'effet de serre augmente néanmoins. À l'inverse, l'effet de serre peut diminuer lorsque le gaz carbonique atmosphérique est fortement mobilisé pour l'altération de roches au contact de l'atmosphère, notamment des basaltes issus des coulées de laves. Dans ce cas l'océan compense une partie de ce déficit en transférant du gaz carbonique vers l'atmosphère, mais l'effet de serre diminue malgré tout. Dans les deux cas, l'activité volcanique globale de la Terre est en cause mais ses manifestions sont différentes. Si celles-ci favorisent les émissions de gaz carbonique par rapport aux émissions de laves, l'effet de serre augmente. Dans le cas inverse, l'effet de serre diminue. De telles circonstances de réduction de l'effet de serre se produisent lorsque, par exemple, la tectonique des plaques ouvre de nouvelles fractures au sein de grandes plaques continentales comme ce fut le cas lors de la fragmentation du supercontinent Rodinia il y a environ 800 millions d'années.

Même si de tels déséquilibres se prolongent pendant des milliers, voire des millions d'années, l'océan joue à court terme son rôle tampon. Il le fait en réagissant aux variations à long terme des émissions ou des pompages de CO_2 que lui impose la tectonique des plaques. Pour cela, il tend à maintenir ses caractéristiques chimiques, notamment son pH, grâce à des échanges de matière avec les croûtes et les sédiments.

Au final, même dans le contexte de variations à long terme imposé par la tectonique des plaques, c'est grâce à l'océan qu'un effet de serre nécessaire à une habitabilité minimale a toujours été maintenu sur la Terre. Et c'est aussi grâce à l'océan que les augmentations de l'effet de serre n'ont jamais dépassé des seuils au-delà desquels la vie entière aurait été menacée.

En science des systèmes complexes, une telle régulation s'appelle un attracteur. Les perturbations qu'elle est capable d'amortir définissent son bassin d'attraction. Au-delà du bassin d'attraction, les perturbations sont trop importantes pour être amorties et le système évolue vers un autre état en se modifiant profondément. C'est un risque qui menace l'habitabilité de notre planète lorsque nous modifions, très intensément et très rapidement, l'effet de serre par nos activités humaines. Le climat que la Terre a connu depuis plusieurs millénaires, relativement régulé par l'océan, pourrait évoluer vers un autre mode. Pour autant l'océan ne cesserait pas d'assurer une régulation de l'effet de serre, mais celle-ci répondrait à des réglages naturels

différents ce qui modifierait bien sûr les conditions d'habitabilité. En raison de la démographie humaine et de l'extension géographique de notre civilisation, il est quasi-certain que ces nouvelles conditions d'habitabilité ne nous seraient pas favorables.

Un attracteur résume parfois le comportement théorique ou observé d'un système complexe, le plus souvent sans que nous sachions expliquer ce comportement. Dans le cas de la régulation de l'effet de serre par l'océan, il s'agit bien d'un système complexe qui donne lieu à un attracteur, mais, grâce à nos connaissances scientifiques en chimie, en géologie, en océanographie et en climatologie nous savons en grande partie expliquer son pouvoir régulateur. C'est un attracteur fondamentalement abiotique, c'est-à-dire où aucun mécanisme biologique n'est nécessaire. Une telle régulation a donc pu commencer à s'exercer avant l'installation de la vie sur la planète. Toutefois, la vie s'est invitée dans cette régulation lorsqu'elle a inventé les concrétions calcaires bactériennes (stromatolithes) il y a plusieurs milliards d'années, ainsi que les concrétions coraliennes, les coquilles et les squelettes il y a plus de 600 millions d'années. La vie utilise là les possibilités de la chimie à son profit et transfère de la matière dissoute vers la matière solide. Elle alimente l'accumulation de sédiments et roches calcaires susceptibles d'entrer dans le jeu complexe de l'attracteur. Mais, bien évidemment, cette médiation biologique est elle-même soumise aux conditions chimiques qui prévalent. En effet la formation biologique de matériaux calcaires est favorisée dans les conditions du pH actuel de l'océan, et le serait encore plus avec des valeurs de pH supérieurs. À l'inverse, dans une eau de mer dont le pH est inférieur à sa valeur actuelle, la formation biologique de matériaux calcaires est défavorisée. C'est une des conséquences de la légère acidification que l'on a observée depuis quelques dizaines d'années dans les eaux de surface des océans, consécutive à l'augmentation de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère.

6. L'océan, médiateur chimique du carbone sur notre planète

Dans l'eau liquide, le gaz carbonique se répartit entre 3 formes chimiques différentes. La première est la molécule de gaz carbonique (CO_2), la seconde est l'ion bicarbonate (HCO_3^-) et la troisième est l'ion carbonate (CO_3^{2-}). Les proportions relatives de ces 3 formes dépendent du caractère acide ou basique de l'eau, c'est-à-dire de son pH. L'eau pure est neutre avec un pH de 7. Si on lui ajoute une quantité

d'un acide, comme par exemple l'acide chlorhydrique, son pH devient inférieur à 7. Si, au contraire, on lui rajoute une quantité d'une base, comme par exemple de la soude (NaOH), son pH devient très supérieur à 7. Le pH de l'eau de mer, compte tenu de l'ensemble des ions dissous qu'elle contient, est légèrement basique, de l'ordre de 8,1. Dans ces conditions, la forme bicarbonate est dominante, tandis que les formes CO_2 dissous et carbonate sont mineures. Le fait d'ajouter ou de soustraire du gaz carbonique à l'eau de mer a pour effet de modifier cette répartition ainsi que le pH. Si l'on ajoute du gaz carbonique à l'eau de mer, on la rend un peu plus acide ce qui favorise la proportion de la forme CO_2 dissous. Si du gaz carbonique s'évade de l'eau de mer, celle-ci devient un peu plus basique ce qui favorise la proportion de la forme carbonate CO_3^{2-}.

Le pH est, par définition, une fonction logarithmique de la concentration en ions hydrogène H^+ présents en solution. Le pH naturel de l'eau de mer est déterminé par les équilibres chimiques qui s'établissent entre tous les ions dissous, dont les charges électriques sont positives (sodium Na^+, calcium Ca^{2+}, magnésium Mg^{2+}, hydrogène H^+ ...) ou négatives (chlore Cl^-, bicarbonate HCO_3^-, carbonate CO_3^{2-}, borate BO_3^{3-}...) et qui, au final, déterminent la concentration en ions H^+ dissous. C'est une caractéristique extrêmement stable qui est principalement due aux contacts entre l'océan et les croûtes nouvellement formées, par exemple lors de l'activité volcanique sous-marine des dorsales océaniques. On pense que le pH de l'eau de mer ne s'est jamais beaucoup écarté de sa valeur actuelle depuis 4 milliards d'années, c'est-à-dire depuis que la Terre est devenue habitable en réduisant significativement son effet de serre primitif. Toutefois, de petites fluctuations peuvent se produire lorsque du gaz carbonique est échangé avec l'atmosphère. Ces variations, bien que mineures, sont à la base de la régulation naturelle à moyen et long terme de l'effet de serre, c'est-à-dire sur des échelles de temps supérieures au millier d'années.

7. Qu'appelle-t-on le paradoxe du Soleil jeune ?

L'océan régule donc la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère, et par là l'effet de serre, avec un pouvoir tampon considérable. Mais bien évidemment le gaz carbonique n'est pas le seul gaz à effet de serre présent dans l'atmosphère. La vapeur d'eau, le méthane, les oxydes de soufre ou d'azote sont également des gaz à effet de serre. La vapeur d'eau se comporte comme un « suiveur » et ne fait qu'amplifier le réchauffement ou le refroidissement qu'induisent d'autre gaz, notamment le gaz

carbonique. Si la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère augmente, la température moyenne augmente ce qui augmente la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère. Mais c'est un processus réversible, et l'inverse se produit lorsque la teneur en gaz carbonique diminue. Les autres gaz à effet de serre sont dans des gammes de teneurs très inférieures à celle du gaz carbonique. Il en résulte que, même si l'effet de serre de leur molécule est intrinsèquement très élevé, comme celui de la molécule de méthane (CH_4), leur impact climatique reste faible par rapport à celui du gaz carbonique.

Il n'en a pas toujours été ainsi dans l'histoire de la Terre. On pense notamment que la teneur en méthane de l'atmosphère a pu être importante à une époque où l'oxygène n'était pas encore présent et où, en conséquence, le méthane pouvait subsister sans être rapidement oxydé par l'oxygène. Cette atmosphère riche en méthane, mais non dépourvue de gaz carbonique, a probablement existé entre l'émergence de la vie il y a environ 4 milliards d'années, et le début de l'accumulation d'oxygène il y a environ 2,5 milliards d'années. Elle serait d'ailleurs une explication de ce que l'on appelle le paradoxe du soleil jeune. Il y a 4 milliards d'années le rayonnement du soleil était d'environ 20 à 30 % plus faible que son rayonnement actuel. Dans ce contexte la réduction de la teneur en gaz carbonique par les océans et l'accumulation de carbonates solides auraient pu conduire à une glaciation globale et à une Terre inhabitable si le gaz carbonique avait été seul présent. Mais un effet de serre plus important, probablement lié à une teneur importante de méthane, a permis à la Terre d'échapper à cette glaciation et à la vie de se poursuivre sans interruption jusqu'à aujourd'hui. Une glaciation importante s'est néanmoins produite entre 2,4 et 2,1 milliards d'années lorsque l'oxygène commençait à s'accumuler dans l'atmosphère, oxydant alors le méthane pour le transformer en gaz carbonique, et réduisant ainsi sévèrement l'effet de serre. Cette glaciation fut très importante mais a néanmoins laissé subsister de petites parties habitables où la vie a été préservée, à partir desquelles l'expansion et l'évolution des espèces a pu reprendre dès que le climat se réchauffa.

8. La tectonique des plaques et l'effet de serre

Une régulation s'exprime toujours autour d'une certaine valeur. Pour le climat terrestre actuel, il s'agit de la température moyenne de la Terre au niveau du sol, environ 15 °C au début de l'ère industrielle, c'est-à-dire avant la perturbation due aux

activités humaines. Mais on sait que la Terre a connu de longues périodes plus froides ou plus chaudes.

Certaines de ces fluctuations climatiques, comme les alternances entre périodes glaciaires et périodes interglaciaires des derniers millions d'années, se sont produites sous l'influence de cycles astronomiques au cours desquels le mouvement de la Terre autour du soleil se modifie. En conséquence la quantité et la répartition du rayonnement solaire à la surface de notre planète varient suivant des cycles de plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers d'années. C'est un aspect sur lequel je reviendrai.

Mais des variations se sont aussi produites à des échelles de temps géologiques, sur des dizaines ou centaines de millions d'années. Il s'agit de longues périodes froides (Terre de type « glacière » ou « *icehouse Earth* » en anglais) pouvant atteindre des paroxysmes comme des glaciations très étendues (Terre boule de neige). Ou, au contraire, ce furent de longues périodes chaudes (Terre de type « serre » ou « *greenhouse Earth* » en anglais) au cours desquelles aucune glaciation ne s'est produite. À quoi sont dues ces phases climatiques majeures du climat terrestre ?

L'activité thermique profonde de la Terre, celle des phénomènes de convection du manteau, est la cause de ce que l'on appelle la tectonique des plaques. Par ses mouvements convectifs, le manteau déplace tout simplement les croûtes solides qui flottent à sa surface. Là où des plaques s'écartent l'une de l'autre, le volcanisme fait remonter du magma et crée une nouvelle croûte. C'est ce qui se passe le long des grandes dorsales océaniques, le volcanisme d'Islande en est un exemple émergé. Là où les plaques s'opposent, la croûte ancienne et la matière qui la surmonte (sédiments, eau de porosité...) peuvent être incorporées dans le manteau en donnant lieu à une autre forme de volcanisme dans la partie sus-jacente, comme celui des Andes. Ces deux grands types de volcanisme ne s'expriment pas de la même manière. Les remontées magmatiques sont, dans tous les cas, composées de laves et de gaz, mais celles du second sont plus riches en gaz. Le rapport global entre les émissions de laves et de gaz volcaniques varie donc en fonction des aléas du lent mouvement des plaques tectoniques et de la position relative des océans et des continents, ce qui modifie profondément le climat terrestre. Examinons de plus près le mécanisme en cause !

Les laves émises par les éruptions volcaniques se solidifient pour donner une roche dense, le basalte. Au contact de l'atmosphère, le basalte est altéré par une réaction chimique qui utilise le gaz carbonique (CO_2) dissous dans l'eau de pluie et qui le

transforme en bicarbonate dissous (HCO_3^-). Ce dernier rejoint ensuite l'eau de mer dont l'équilibre chimique se réajuste en favorisant la formation de sédiments carbonatés et l'émission de gaz carbonique vers l'atmosphère. Au final, sur deux atomes de carbone atmosphérique utilisés pour l'altération des basaltes, un est restitué à l'atmosphère, mais un autre est incorporé aux sédiments pour de très longues périodes géologiques. En conséquence, ce mécanisme naturel pompe le CO_2 de l'atmosphère et réduit l'effet de serre. Lorsque ce pompage est plus important que les émissions de gaz carbonique par les volcans, le climat de la Terre se refroidit. À L'inverse, le climat se réchauffe lorsque les émissions volcaniques de gaz carbonique sont dominantes.

Bien évidemment, le volcanisme n'est pas seul en cause dans cet affrontement entre les sources et les puits naturels de gaz carbonique. Par exemple, la formation rapide et l'érosion de chaînes de montagnes peuvent mettre au contact de l'atmosphère d'autres roches telles les granites. Celles-ci sont alors altérées, comme les basaltes, par le gaz carbonique de l'atmosphère, agissant ainsi en faveur de la réduction de l'effet de serre.

Dans certains contextes géologiques, de tels refroidissements ont été très importants, au point même d'entraîner le climat terrestre dans des glaciations extrêmes dites Terre Boule de Neige. Des îlots habitables ont néanmoins été préservés dans certaines régions, notamment dans la ceinture intertropicale, d'où l'expansion des populations et la diversification des espèces a pu reprendre dès que le climat se réchauffa. Une telle glaciation globale s'est produite lors d'un refroidissement majeur provoqué par la dislocation d'un supercontinent, la Rodinia. Celui-ci a commencé à se fragmenter il y a 800 millions d'années, sous l'action d'immenses failles volcaniques, donnant lieu à la formation de nouvelles croûtes basaltiques et de nouveaux océans. Le refroidissement concomitant a atteint son paroxysme, sous forme d'une glaciation globale, il y a 700 millions d'années.

CHAPITRE 3

La Terre et l'information
ou la Terre génétique

1. La structuration de la matière est d'abord une accumulation d'information

La matière se structure en regroupant des entités de matière. Les quarks forment des protons et des neutrons, ceux-ci forment des noyaux d'atomes qui s'associent à des électrons pour former des atomes. Les atomes eux-mêmes peuvent se regrouper pour former des molécules, des macromolécules ou des cristaux. Les molécules s'associent pour former des êtres vivants tandis que les cristaux forment des objets minéraux solides. Dans l'immensité cosmique, toutes les entités de matière tendent à se regrouper sous l'effet de l'attraction gravitationnelle pour former des étoiles, des planètes, des astéroïdes, des comètes, mais aussi des galaxies et des amas de galaxies. Par les mots que nous venons d'utiliser, nous comprenons implicitement que la structuration de la matière n'est pas simplement une addition des masses regroupées, mais qu'elle porte en elle-même une information particulière qui est la spécificité d'un objet structuré. Un cristal n'est pas un être vivant même si sa masse est la même. Avec une même collection d'atomes dispersés il y a une infinité de combinaisons chimiques possibles pour former des molécules. Pour une même collection d'atomes, caractérisée par une certaine masse, chaque combinaison a sa spécificité et ne porte donc pas la même quantité d'information que les autres, ni que la collection des atomes dispersés.

La structuration de la matière est une accumulation d'information, celle que requiert la description de l'objet structuré. En cela, certains objets de très faible masse peuvent contenir beaucoup plus d'information qu'une étoile ou même que l'ensemble de toute la matière de l'Univers dans son état juste après le Big Bang.

L'information n'est pas un concept abstrait dont on ne parlerait qu'en termes vagues ou superficiels. Il est notamment présent dans les théories de la physique statistique.

La matière est composée d'éléments microscopiques qui se combinent et s'assemblent pour former des éléments de plus grande taille, lesquels peuvent encore se combiner pour aboutir à des structures macroscopiques (**Figure 3.1**). Dans un état microscopique dispersé, les éléments de la matière sont indépendants et peuvent évoluer entre tous leurs degrés de liberté possibles. C'est, par exemple, le cas de molécules d'eau en phase vapeur dans l'atmosphère. Un tel état ne porte que peu d'information car, statistiquement, toutes les molécules d'eau se comportent de la même façon. Pour décrire le système de l'ensemble des molécules d'eau dans un volume d'atmosphère, il suffit donc de décrire le comportement d'une molécule en ajoutant que toutes se comportent ainsi. Pour aller vers un état macroscopique, les molécules d'eau établissent entre eux des interactions qui restreignent leurs possibilités et qui aboutissent à une certaine structure. Dans l'atmosphère elles peuvent ainsi, sous l'action des forces électromagnétiques et d'une température plus faible (qui restreint leur agitation), se regrouper en cristaux de glace où leurs interactions privilégient des plans et des angles compte tenu de leurs propriétés géométrique (angle formé par la molécule) et électrique (polarité électrique de la molécule). Dans un tel état, toutes les molécules n'ont pas le même comportement. L'information est plus importante car il faut décrire les interactions qui les lient.

Le passage d'un état dispersé à un état structuré de la matière réduit donc le désordre et augmente l'information. C'est précisément sur la notion d'ordre et de désordre que la thermodynamique statistique a établi une théorie. Une équation proposée par Boltzmann au XIX^{e} siècle relie l'énergie interne d'un système à sa température. Dans cette équation, la constante de Boltzmann (k), une des 4 constantes fondamentales de la physique, est un facteur statistique de proportionnalité entre l'énergie et la température d'un système.

Le désordre est quantifié par une grandeur statistique que l'on appelle l'entropie. Plus précisément, c'est le nombre d'états possibles entre lesquels un système isolé, composé de matière et d'énergie, peut se distribuer. Un système dont la matière est très dispersée dispose d'une forte entropie car ses constituants microscopiques subissent peu de contraintes et peuvent adopter presque tous les micro-états possibles. Alors qu'un système dont la même matière est ordonnée, c'est-à-dire plus structurée, a une plus faible entropie parce que ses constituants microscopiques sont soumis aux contraintes des interactions qui les lient. Le nombre d'états possibles est donc plus faible. Soulignons au passage que la notion d'ordre ou de désordre a quelque chose à voir avec la notion de symétrie ! En effet, un système où la matière

est dispersée et se distribue uniformément dans le volume de ce système (distribution isotrope) dispose d'une symétrie maximale. Dès que la matière se structure, des ruptures de symétrie interviennent. Cela aboutit par exemple à l'idée contre-intuitive qu'un cristal est assez peu symétrique. Sa symétrie n'existe que par rapport à certains plans ou à certains axes, mais un cristal est beaucoup moins symétrique qu'un volume homogène où les mêmes atomes sont dispersés et sans interactions entre eux (plasma).

L'ordre et le désordre en physique

La notion d'ordre, ou de désordre, ne comporte aucun aspect laudatif ou péjoratif en physique. Dans un système en désordre, les éléments microscopiques sont dispersés, mais ils disposent alors d'un maximum de degrés de liberté pour évoluer entre tous leurs micro-états possibles. En bref, le désordre c'est la liberté de la matière, alors que l'ordre est une restriction de liberté pour la matière. Mais d'un autre côté, l'évolution vers l'ordre est créative car elle donne lieu à des structures de la matière, dont celles de la vie, alors que l'évolution vers le désordre (celle du second principe de la thermodynamique) ne répond qu'à la recherche de l'équilibre thermodynamique et de l'uniformité maximum possible compte tenu de l'énergie interne du système (on parle même parfois de mort thermodynamique).

On peut se demander pourquoi la physique a décidé de faire de l'entropie la mesure du désordre et non de l'ordre. Ce n'est pas une décision arbitraire, mais la conséquence d'une loi physique fondamentale qui veut que la matière évolue spontanément vers le désordre. Certains lieux communs de nos conversations expriment cela : « laissez faire et le bazar s'installe ! » ; « la nature a horreur du vide ». Cette loi s'appelle le second principe de la thermodynamique. Elle est intangible. Elle est due au fait qu'un système très dispersé est plus proche de l'équilibre thermodynamique qu'un système structuré. Mais alors pourquoi la matière réussit-elle parfois à se structurer ?

En fait, un système peut structurer sa matière interne en transformant de l'énergie issue de l'univers extérieur à lui. Une condition à cela est que ses limites externes doivent être perméables aux échanges d'énergie et que, donc, le système ne soit pas strictement isolé. Un tel système peut alors importer une certaine quantité d'énergie de basse entropie, c'est-à-dire facilement transformable, dont il va se servir pour structurer sa matière. En vertu du principe de conservation de l'énergie, il restitue ensuite la même quantité d'énergie à l'Univers, mais dotée d'une plus haute entropie, c'est-à-dire moins facilement transformable. Au passage le système a réduit son entropie propre, mais l'entropie globale de l'Univers est restée constante ou a augmenté, conformément au second principe de la thermodynamique. La dérogation à cette loi physique fondamentale ne peut donc être que locale et temporaire, c'est-à-dire dans un système limité, et au prix d'une transformation d'énergie. La Terre, par exemple, déroge au second principe de la thermodynamique pour maintenir ou augmenter la structuration de sa matière interne. Elle le fait en important du rayonnement solaire et en restituant l'énergie équivalente sous-forme de rayonnement infrarouge, de plus forte entropie que le rayonnement solaire incident, vers l'espace.

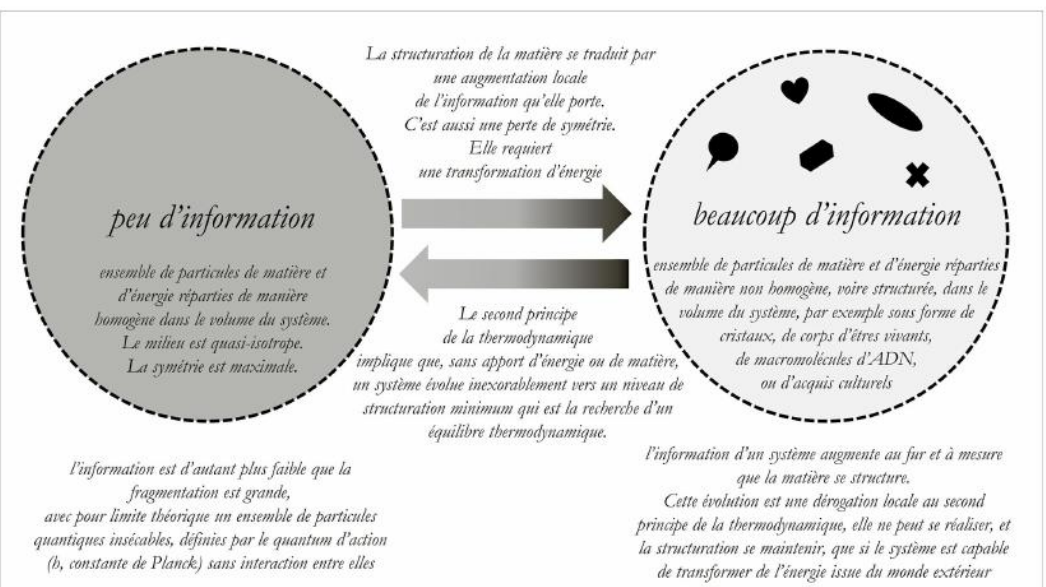
Comme nous sommes plus habitués à manipuler ou observer des objets macroscopiques que des particules microscopiques isolées, nous sommes davantage familiers des propriétés et grandeurs statistiques (forme, couleur, température, dureté, viscosité, rugosité, salinité...), celles qui naissent des innombrables interactions entre les particules. Or, dans ce monde macroscopique gouverné par la statistique, l'information structurelle est d'autant plus importante que l'entropie est faible, et inversement. Sur le plan de la physique statistique, l'information est donc une grandeur inverse de l'entropie, ou une entropie négative, qu'on appelle parfois la néguentropie.

Mais que se passe-t-il lorsque nous quittons le monde où règne l'ordre statistique des interactions entre les particules, pour entrer dans un monde sans interactions où les particules les plus fondamentales, comme les quarks, sont isolées ? Que deviennent les concepts d'entropie et d'information lorsque la dispersion de la matière est à son maximum ?

La réponse est relativement simple. Une particule fondamentale de matière ou d'énergie est isolée lorsqu'elle n'a aucune interaction avec aucune autre particule. Elle ne contient donc aucune autre information que celle de ses propres caractéristiques originelles (énergie et masse, spin, charge électrique), et celles-ci ne

peuvent être mesurées directement puisque cela reviendrait à établir des interactions avec un système de mesure. L'information structurelle (ou l'ordre), celle qui nous intéresse ici, n'a réellement un sens et ne commence à croître (et le désordre à décroître) qu'avec l'établissement d'interactions entre des particules.

En se structurant, la matière accumule localement de l'information. Mais un état très structuré de la matière est le plus souvent instable car il est éloigné de l'équilibre thermodynamique. Le second principe de la thermodynamique exprime le fait que la matière tend à rejoindre l'équilibre thermodynamique, donc à se déstructurer. La structuration locale de la matière, et son maintien, requiert d'emprunter de l'énergie au monde extérieur, et de la lui restituer sous une forme dégradée, c'est-à-dire moins utilisable (ou moins structurée). C'est par exemple ce que fait la Terre en transformant une partie de l'énergie solaire incidente et en renvoyant la même quantité d'énergie vers l'espace sous forme de rayonnements infrarouges. La dérogation locale au second principe de la thermodynamique se paye donc en exportant du désordre vers l'Univers, de sorte que le second principe est globalement bien respecté. Pour l'exemple de la Terre, le flux d'énergie infrarouge vers l'espace comporte davantage de photons que le flux d'énergie solaire incident, même si ces deux flux sont équivalents en quantité d'énergie. Il s'agit donc d'une énergie plus dispersée et moins structurée que le système Terrestre rejette après avoir transformé de la structure (ou information) énergétique, en structure (ou information) matérielle.


La structuration de la matière se traduit par une augmentation locale de l'information qu'elle porte. C'est aussi une perte de symétrie. Elle requiert une transformation d'énergie
peu d'information
ensemble de particules de matière et d'énergie réparties de manière homogène dans le volume du système. Le milieu est quasi-isotrope. La symétrie est maximale.
beaucoup d'information
ensemble de particules de matière et d'énergie réparties de manière non homogène, voire structurée, dans le volume du système, par exemple sous forme de cristaux, de corps d'êtres vivants, de macromolécules d'ADN, ou d'acquis culturels
Le second principe de la thermodynamique implique que, sans apport d'énergie ou de matière, un système évolue inexorablement vers un niveau de structuration minimum qui est la recherche d'un équilibre thermodynamique.
l'information est d'autant plus faible que la fragmentation est grande, avec pour limite théorique un ensemble de particules quantiques insécables, définies par le quantum d'action (h, constante de Planck) sans interaction entre elles
l'information d'un système augmente au fur et à mesure que la matière se structure. Cette évolution est une dérogation locale au second principe de la thermodynamique, elle ne peut se réaliser, et la structuration se maintenir, que si le système est capable de transformer de l'énergie issue du monde extérieur

2. Qu'est-ce que l'information génétique ?

L'émergence de la vie a été le début d'un nouveau mode de structuration de la matière, accompagnée d'une énorme accumulation d'information.

Une part de l'information biologique décrit les corps des êtres vivants de ceux des plus simples bactéries à ceux des organismes pluricellulaires les plus complexes, plantes et animaux. Mais une autre part, tout aussi importante, décrit les structures moléculaires à la base des métabolismes des êtres vivants, ainsi que les interactions entre ces molécules, sans lesquelles les êtres vivants ne seraient tout simplement... pas vivants. Cette information moléculaire contient en son sein une part qui joue un rôle singulier et déterminant pour l'existence de la vie. Il s'agit de l'information génétique, celle qui décrit le patrimoine génétique d'un être vivant, et qui est la seule à être transmise d'une génération à une autre. Toutes les autres formes d'information biologique disparaissent à la mort d'un être vivant. Mais si celui-ci a engendré une descendance, l'information génétique qu'il portait a été préservée dans des cellules filles (pour les bactéries, les archées et les protistes), ou dans des cellules de la reproduction (gamètes) et des cellules souches pour les êtres vivants eucaryotes pluricellulaires (plantes, animaux, champignons). C'est à partir de ces cellules descendantes, porteuses de l'information génétique, que les autres types d'information biologique se sont reconstruites, celle des corps et celle des métabolismes, en formant d'autres êtres vivants (**Figure 3.2**). Les biologistes déploient de grands efforts de recherche à propos des nécessités qui guident le développement des nouveaux êtres vivants, ou de leurs embryons, à partir de l'information génétique contenue dans les cellules souches. On sait que les mécanismes épigénétiques, c'est-à-dire d'activation ou d'inactivation des gènes, ainsi que la sélection naturelle y jouent un rôle important.

Précisons ici que l'information génétique n'est pas une exclusivité biologique ! En effet, des systèmes chimiques autoréplicatifs peuvent se mettre en place naturellement, ou être mis en place en laboratoire. Dans ce cas, la structure moléculaire qui se reproduit est fondamentale génétique puisqu'elle porte en elle l'information nécessaire à la reproduction du système, mais elle n'est pas biologique au sens que nous donnons à ce mot. C'est d'ailleurs à partir de tels systèmes chimiques autoréplicatifs, prébiotiques, mis en place dans des conditions physico-chimiques favorables, que la vie a pu émerger. Les molécules d'ADN qui portent

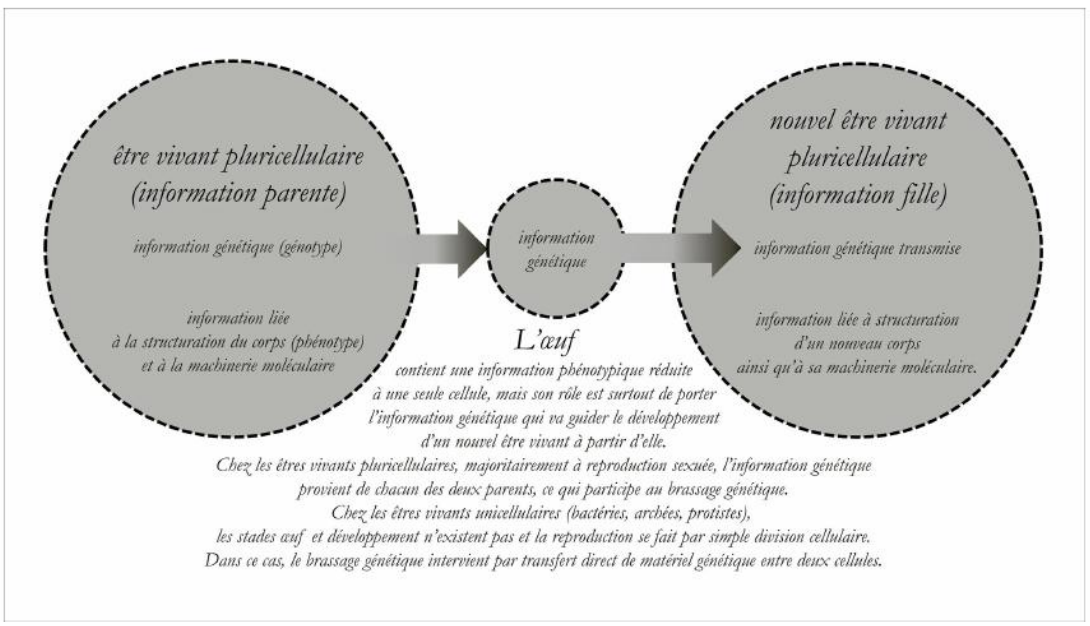
l'information génétique des êtres vivants actuels, ont donc été précédées par d'autres molécules, plus simples, porteuse de l'information génétique prébiotique, puis de l'information génétique des êtres vivants qui ne disposaient pas encore de l'ADN. L'hypothèse dite d'un « monde ARN » imagine par exemple que, au-delà des premiers systèmes chimiques autoréplicatifs, des molécules de type ARN auraient pu constituer la base porteuse de l'information génétique des premiers êtres vivants.

3. L'information génétique, l'adaptabilité et la régulation

Il existe donc une forme de structuration de la matière qui se transmet directement d'une génération êtres vivants à une autre, entraînant avec elle l'information qu'elle porte. Cette information est suffisante pour que la descendance de la cellule souche initiale reconstruise un nouvel être vivant pluricellulaire. Celui-ci n'est toutefois pas l'exacte réplique du précédent. D'une part des mutations, c'est-à-dire des modifications de l'information génétique, ont pu intervenir au cours de la vie du parent, ou au cours du processus de reproduction. D'autre part les conditions environnementales successives que connaissent les cellules au cours du développement embryonnaire ne sont jamais exactement les mêmes, ce qui modifie parfois l'état d'activation ou d'inhibition de certains gènes.

D'une génération à une autre, les êtres vivants sont donc légèrement différents, ce qui les prédispose plus ou moins à survivre et à se reproduire eux-mêmes. Ceux qui ont de meilleures aptitudes se reproduisent davantage et transmettent ces meilleures aptitudes à leurs descendants. Au final, la population des plus aptes domine, et parfois remplace les populations moins adaptées. C'est ainsi qu'il faut comprendre la sélection naturelle, le pilier explicatif de la théorie de l'évolution proposée par Darwin. Cette explication a été détournée de son sens premier dans l'expression « la survie du plus apte », qui substitue abusivement la survie des individus à celle des espèces. Elle fut hélas employée largement à la fin du XIX^{e} siècle pour justifier ce que l'on a appelé le darwinisme social, et même l'eugénisme où l'homme voulait

Chez les êtres vivants pluricellulaires, c'est l'information génétique (génotype) qui se transmet lors du passage d'une génération à une autre. L'information du corps parent (phénotype) est, quant à elle, amenée à disparaître, et une nouvelle information phénotypique se reconstitue au travers du développement d'un nouvel individu.


être vivant pluricellulaire
(information parente)
information génétique (génotype)
information liée
à la structuration du corps (phénotype)
et à la machinerie moléculaire
information
génétique
L'œuf
contient une information phénotypique réduite
à une seule cellule, mais son rôle est surtout de porter
l'information génétique qui va guider le développement
d'un nouvel être vivant à partir d'elle.
nouvel être vivant
pluricellulaire
(information fille)
information génétique transmise
information liée à structuration
d'un nouveau corps
ainsi qu'à sa machinerie moléculaire.
Chez les êtres vivants pluricellulaires, majoritairement à reproduction sexuée, l'information génétique
provient de chacun des deux parents, ce qui participe au brassage génétique.
Chez les êtres vivants unicellulaires (bactéries, archées, protistes),
les stades œuf et développement n'existent pas et la reproduction se fait par simple division cellulaire.
Dans ce cas, le brassage génétique intervient par transfert direct de matériel génétique entre deux cellules.

jouer lui-même, et sur sa propre espèce, le rôle de sélecteur. S'il est vrai qu'une sélection artificielle peut avoir des avantages en agriculture, il faut toujours se demander si les plantes et animaux d'élevage seraient bien adaptés dans le contexte de la sélection naturelle. Pour beaucoup d'entre eux la réponse est négative car la sélection dont ils sont le produit visait des critères strictement économiques comme une croissance rapide, une meilleure production de lait ou de viande, mais ne se préoccupait pas de l'aptitude à résister aux prédateurs ou aux maladies. Ceci signifie que la sélection naturelle ne laisserait que peu de possibilités de descendance aux variétés d'élevage et que, en conséquence, des espèces sauvages ou des hybrides prendraient rapidement le dessus.

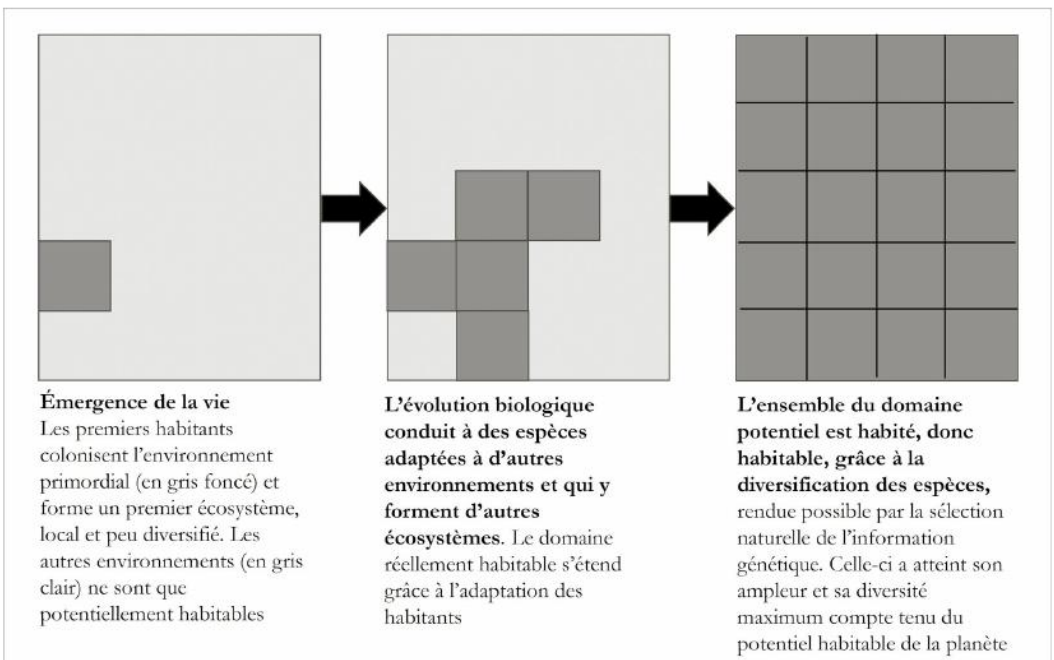
La sélection naturelle s'exerce de diverses manières. Les modifications génétiques défavorables empêchent ou restreignent la descendance des individus qui les portent, ce qui aboutit rapidement à leur élimination du patrimoine génétique de l'espèce. Certaines modifications génétiques permettent au contraire à des individus d'avoir une descendance plus nombreuse et plus adaptée que celles d'autres individus. Ceci aboutit à la propagation de ces modifications favorables au sein du patrimoine génétique des espèces. Il ne s'agit ici que de modifications aléatoires, celles des mutations. Elles peuvent aboutir à une évolution des espèces dans un environnement physico-chimique stable. Mais des changements environnementaux se produisent en permanence, comme ceux du climat (gammes des températures, aridité, pluviosité, rythmes saisonniers...), des caractéristiques de l'eau (pH, teneur en nutriments, teneur en oxygène dissous...), de la teneur en oxygène gazeux de l'atmosphère, ainsi que de la présence des autres espèces formant l'écosystème. De tels changements jouent bien sûr un rôle dans l'évolution des espèces car des individus porteurs de certaines modifications génétiques y sont mieux adaptés que d'autres. En conséquence, leur descendance est plus nombreuse et contribue génétiquement à ce que l'espèce évolue dans le sens d'une adaptation au nouvel environnement. La sélection naturelle, celle de l'information génétique, s'exerce donc aussi sous l'effet de la pression environnementale.

Plus étonnant encore ! La sélection naturelle de l'information génétique a diversifié les espèces au point qu'un maximum des environnements terrestres habitables ont été colonisés (**Figure 3.3**). Je pourrais même dire ici qu'un maximum d'environnements terrestres sont devenus habitables parce que des espèces s'y sont adaptées. En d'autres termes, c'est la plasticité évolutive liée à l'existence de l'information génétique qui a étendu au maximum la sphère habitable de notre

planète, c'est-à-dire l'ensemble des milieux réellement habités, ceux que l'adaptation des espèces a rendus habitables (habitabilité subjective) à partir des conditions minimales nécessaires – mais non suffisantes – à la présence de la vie (habitabilité objective).

Mais toujours plus étonnant ! L'extension maximum de la sphère habitable signifie aussi que les populations d'être vivants furent rapidement importantes et qu'elles ont, par leurs métabolismes bioénergétiques principaux, la photosynthèse et les respirations, agi massivement sur les échanges de matière. Par la photosynthèse, les êtres vivants prélèvent du gaz carbonique de l'atmosphère ou de l'océan, et y rejettent de l'oxygène. Par leurs respirations, ils prélèvent de l'oxygène et rejettent du gaz carbonique. Ces deux mécanismes antagonistes furent, pendant une très longue période, déséquilibrés. L'émergence génétique de la photosynthèse donna d'abord un avantage considérable à certaines espèces, celui de la production primaire, c'est-à-dire la capacité de produire des molécules biologiques à partir des composés minéraux simples de leur environnement (gaz carbonique, nitrate, phosphate...) et de les organiser en une dynamique fonctionnelle, tout cela en utilisant l'inépuisable et abondante énergie solaire. C'est ainsi que les espèces photosynthétiques prospérèrent. Mais, ce faisant, elles accumulèrent de l'oxygène dans l'océan et l'atmosphère, ce qui imposa une nouvelle contrainte environnementale à la sélection naturelle. Ce fut une contrainte puissante car les êtres vivants n'étaient pas adaptés à l'oxygène qui est intrinsèquement toxique pour toute forme de vie. Cette contrainte favorisa donc des êtres vivants dont les modifications génétiques leur permettaient de mieux se protéger de l'oxygène, voire même d'en tirer parti pour des besoins bioénergétiques. L'une de ses modifications génétiques permis à certaines bactéries primitives, ancêtres des actuelles mitochondries, de respirer l'oxygène, et par là, de prospérer à leur tour. En respirant, un être vivant fait réagir de la nourriture avec de l'oxygène, ce qui produit de l'énergie tout en fournissant des nutriments nécessaires à l'élaboration de nouvelles molécules biologiques. Mais la respiration revient aussi à donner à l'oxygène des proies chimiques, limitant ainsi la possibilité d'oxydation des molécules biologiques. Bien avant

La transmission de l'information génétique et sa sélection naturelle au travers des générations successives aboutit à une évolution des espèces ainsi qu'à la création d'espèces nouvelles lorsque la distance génétique entre les branches évolutives est trop grande. Ces espèces nouvelles s'adaptent à des environnements qui n'étaient pas encore habitables pour celles qui les ont précédées. La diversification de l'information génétique, c'est-à-dire des espèces, étend ainsi le domaine habitable de la planète. Les environnements qui n'étaient que potentiellement habitables deviennent réellement habitables grâce à l'adaptation évolutive des habitants et à la structuration des écosystèmes locaux.



Émergence de la vie
Les premiers habitants colonisent l'environnement primordial (en gris foncé) et forme un premier écosystème, local et peu diversifié. Les autres environnements (en gris clair) ne sont que potentiellement habitables

L'évolution biologique conduit à des espèces adaptées à d'autres environnements et qui y forment d'autres écosystèmes. Le domaine réellement habitable s'étend grâce à l'adaptation des habitants

L'ensemble du domaine potentiel est habité, donc habitable, grâce à la diversification des espèces, rendue possible par la sélection naturelle de l'information génétique. Celle-ci a atteint son ampleur et sa diversité maximum compte tenu du potentiel habitable de la planète

que la respiration ne devienne ce métabolisme bioénergétique fondamental dont disposent quasiment tous les êtres vivants, même les êtres photosynthétiques, sa nécessité originelle fut donc un besoin de protection vis-à-vis de l'oxygène émis par la photosynthèse. Il faut signaler ici que la respiration de l'oxygène n'est pas la seule. Lorsque l'oxygène est absent, dans des milieux dits anoxiques, il existe des respirations utilisant des oxydants moins puissants comme par exemple les nitrates (oxydes d'azote) et les sulfates (oxydes de soufre). Ces respirations, qui sont aussi une forme d'adaptation évolutive, ont permis à certains organismes de coloniser les rares milieux anoxiques de la planète. D'un point de vue global, ces respirations dépendent néanmoins de l'oxygène et participent aussi à sa consommation globale puisque les stocks de nitrate ou de sulfate doivent se reconstituer, et qu'ils ne peuvent le faire qu'au contact de l'oxygène. Celui-ci réagit en effet sur les produits des respirations comme les nitrites (NO_2^-, forme peu oxydée dissoute de l'azote), l'azote moléculaire (N_2, gazeux, celui de l'air), le dioxyde d'azote (NO_2, forme peu oxydée gazeuse de l'azote) ou les sulfures (par exemple H_2S, forme réduite gazeuse du soufre) pour les reconvertir respectivement en nitrates ou en sulfates. Notons ici que la notion d'oxydation a été étendue en chimie et ne dépend pas exclusivement de l'intervention de l'oxygène. Un élément est plus ou moins oxydé dans une molécule lorsque ses électrons sont déplacés vers un ou plusieurs autres éléments plus attracteurs d'électrons que lui-même. Il constitue alors un pôle électriquement positif dans la molécule. À l'inverse, l'élément oxydant qui attire les électrons vers lui, est dit réduit, et constitue un pôle électriquement négatif dans la molécule. C'est le cas du soufre dans la molécule H_2S.

Le recyclage par l'oxygène des oxydants faibles, nécessaires aux respirations anaérobies, a lieu par la voie minérale directe ou par une voie biologique médiatrice, comme par exemple celle des bactéries photosynthétiques capables d'utiliser l'azote moléculaire N_2 (activité diazote-trophique).

L'évolution de l'information génétique permet donc aux espèces de coloniser au maximum les environnements planétaires, et de modifier les milieux de vie par les échanges de matière liés aux métabolismes bioénergétiques. Subséquemment, elle permet aux espèces de s'adapter aux modifications environnementales qu'elles ont elles-mêmes provoquées.

Ce principe est celui d'une coévolution interactive de l'ensemble des espèces et des conditions globales d'habitabilité (**Figure 3.4**), qui fait appel à de multiples boucles de rétroaction (boucles auto-référentes). Cette coévolution est fondamentalement génétique puisqu'elle dépend des modifications du patrimoine génétique de l'ensemble des espèces vivantes. Pour ce qui concerne l'oxygénation de notre planète, l'aboutissement de cette coévolution est une régulation globale, dont l'indice mesurable est la stabilité de la teneur en oxygène dans l'atmosphère (21 % en volume) depuis environ 300 millions d'années. C'est un pan de l'évolution terrestre que je décris plus en détails dans le chapitre 6.

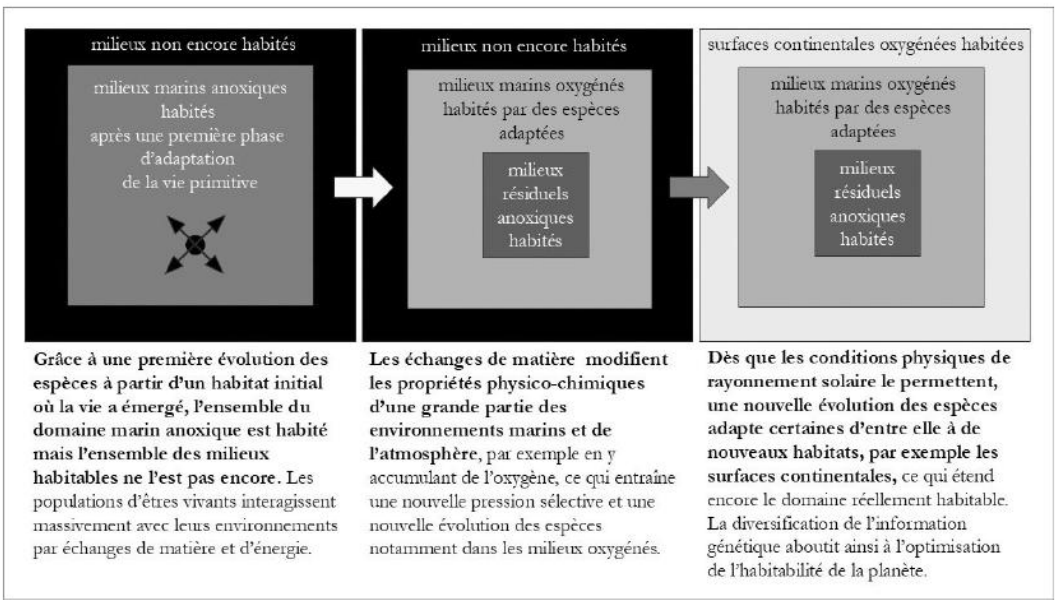
4. Le début de l'information biologique, ou l'émergence de la vie

Il est courant de parler d'émergence pour désigner l'origine de la vie sur la planète. Mais qu'est-ce précisément que l'émergence ?

Au-delà de l'idée intuitive que nous nous en faisons, la notion d'émergence provient de l'étude scientifique du comportement des systèmes dynamiques complexes, aussi appelée science du chaos. Ceux-ci sont caractérisés par un ensemble d'éléments qui interagissent entre eux. Leur évolution globale est fondamentalement imprévisible comme le souligne Stuart Kauffman dans son ouvrage *Au-delà de la physique*, et d'infimes perturbations peuvent aboutir à des évolutions très différentes. C'est l'effet papillon. Mais on observe aussi qu'à partir d'un comportement chaotique, certains systèmes complexes donnent naissance à des structures particulières. Ce sont des émergences par lesquelles de l'ordre, c'est-à-dire de l'information, naît du chaos !

Dans son ouvrage qu'est-ce que l'émergence ? Hugues Bersini a exploré ce concept et en a tiré la conclusion que les émergences vraies sont celles qui sont stables, au sens stationnaire du terme. C'est le cas lorsque le système complexe en question se comporte comme un attracteur et résiste, jusqu'à un certain point, à des perturbations. Ce sont les attracteurs étranges modélisés numériquement par les mathématiques. Poussant un peu plus loin le raisonnement, Hugues Bersini a conclu que la plus grande stabilité d'une émergence était atteinte lorsque celle-ci contenait une information génétique qui a la capacité

La diversification et la sélection naturelle de l'information génétique aboutissent non seulement à une occupation maximum des habitats initialement possibles, mais également à une modification des propriétés physico-chimiques d'une partie d'entre eux, ce qui introduit une nouvelle pression pour l'évolution des espèces et étend encore le domaine potentiellement habitable. Finalement, l'habitabilité de la planète est optimisée grâce à la plasticité évolutive que lui confère l'information génétique. La Terre est ainsi fondamentalement génétique !


milieux non encore habités
milieux marins anoxiques habités après une première phase d'adaptation de la vie primitive
milieux non encore habités
milieux marins oxygénés habités par des espèces adaptées
milieux résiduels anoxiques habités
surfaces continentales oxygénées habitées
milieux marins oxygénés habités par des espèces adaptées
milieux résiduels anoxiques habités
Grâce à une première évolution des espèces à partir d'un habitat initial où la vie a émergé, l'ensemble du domaine marin anoxique est habité mais l'ensemble des milieux habitables ne l'est pas encore. Les populations d'êtres vivants interagissent massivement avec leurs environnements par échanges de matière et d'énergie.
Les échanges de matière modifient les propriétés physico-chimiques d'une grande partie des environnements marins et de l'atmosphère, par exemple en y accumulant de l'oxygène, ce qui entraîne une nouvelle pression sélective et une nouvelle évolution des espèces notamment dans les milieux oxygénés.
Dès que les conditions physiques de rayonnement solaire le permettent, une nouvelle évolution des espèces adapte certaines d'entre elle à de nouveaux habitats, par exemple les surfaces continentales, ce qui étend encore le domaine réellement habitable. La diversification de l'information génétique aboutit ainsi à l'optimisation de l'habitabilité de la planète.

de se reproduire, ce qui lui confère la possibilité de s'adapter au travers de la sélection naturelle.

Dans ces conditions, un système complexe émergent tel qu'un être vivant primitif est capable non seulement de résister à des perturbations externes modérées, ce qui est sa propriété de régulation métabolique, mais il participe aussi à la résilience de la population dont il fait partie au travers de l'évolution de son espèce *via* la reproduction. La gamme des capacités d'auto-régulation d'un individu (de l'autopoïèse individuelle) s'adapte ainsi peu à peu au déplacement de la gamme des perturbations de son milieu de vie.

L'émergence de l'information biologique, il y a environ 4 milliards d'années, a été celle de l'information génétique des systèmes chimiques prébiotiques autoréplicatifs (la part d'information qui est transmise au système répliqué et qui lui confère ses propriétés primordiales de développement et de vie) associée à celle des premiers corps (celle que requiert la description des systèmes chimiques autoréplicatifs eux-mêmes). Mais cette information biologique émergente ne se reproduit que dans un milieu de vie. C'est pourquoi le duo des informations génétiques (génotype) et corporelles (phénotype) est insuffisant. C'est en fait le trio génotype-phénotype-informations environnementales, où s'exercent de multiples boucles auto-référentes, qui est indissociable pour expliquer l'adaptation autoréférente des espèces et de leur environnement (ou coévolution vivant-environnement), donc le maintien de la vie pendant tant de temps sur la Terre. Pour les lecteurs qui voudraient en savoir plus sur les boucles autoréférentes en biologie évolutive, je recommande la lecture de l'ouvrage *Penser l'évolution* de Hervé Le Guyader, Actes Sud, 2012.

Mais seule l'information génétique, conformément à la nature de son émergence *via* les systèmes chimiques prébiotiques, peut se répliquer même si elle le fait *via* les corps ! Elle est la base théorique de l'hérédité dont Mendel a découvert les lois au XIX^e^ siècle, et par là de l'évolution des espèces *via* la sélection naturelle, mécanisme proposé par Darwin dès la première édition de *L'origine des espèces* en 1859. L'information génétique est la seule à évoluer vraiment sur le long terme car les corps apparaissent et disparaissent à court terme alors que l'information génétique se transmet avec d'éventuelles modifications (mutations) ou des recombinaisons (échanges horizontaux de gènes ou reproduction sexuée).

5. L'information génétique n'est pas égoïste

C'est dans un milieu où régnaient à la fois les conditions objectives (minimum) de l'habitabilité et certaines conditions complémentaires que les premiers êtres vivants ont émergé et ont commencé à se développer. Mais, très vite, le vivant a lui-même fait évoluer les conditions de l'habitabilité terrestre, c'est-à-dire celles qui s'ajoutent aux conditions objectives pour qu'un milieu soit réellement (subjectivement) habitable par un groupe d'espèces. L'évolution adaptative de certaines espèces leur a permis d'habiter, donc de rendre subjectivement habitables, des milieux qui ne l'étaient pas encore pour les espèces primitives. Cette évolution, par le rôle qu'elle exerce sur l'extension de l'habitabilité terrestre subjective, est fondamentalement basée sur l'existence d'une information qui s'autoreproduit (ou information génétique). Mais l'extension des populations d'êtres vivants leur a permis d'agir de plus en plus massivement, par échanges de matière, avec leurs milieux de vie, notamment l'eau, l'air et les sols et d'en modifier significativement les propriétés, créant ainsi une nouvelle pression sélective, rétroactive, pour l'évolution des espèces. Il ne s'agit alors plus d'une simple évolution biologique des espèces, mais d'une coévolution interactive de la biosphère et des milieux de vie. L'évolution de l'habitabilité globale de la Terre, combinaison de conditions plus ou moins favorables sur une aire plus ou moins étendue (sphère habitable) est donc une propriété fondamentalement génétique ! Même si la Terre ne se reproduit pas et ne peut donc, selon Richard Dawkins, l'auteur du livre *le gène égoïste*, être considérée comme un être vivant, elle évolue en s'appuyant sur la capacité d'évolution de tous les êtres vivants qui en font partie. À l'échelle planétaire l'action du gène n'est pas égoïste mais contribue à la « recherche » inconsciente d'une régulation de l'ensemble du système Terre !

CHAPITRE 4

La Terre et l'énergie

La machine énergétique la plus aboutie grâce aux émergences de la photosynthèse et de la respiration

1. Qu'est-ce que l'énergie ?

Dans les théories de la physique moderne, la réalité profonde de notre univers est fondée sur trois concepts fondamentaux, ceux d'espace-temps, d'énergie et de matière, sur les 4 interactions fondamentales qui les relient (nucléaire forte, nucléaire faible, électromagnétique, gravitaire), et sur 4 constantes fondamentales (la vitesse de la lumière C, la constante de la gravité G, la constante de Planck h, et la constante de Boltzmann k).

On sait parfaitement quantifier une quantité d'énergie en joules ou en calories, ainsi qu'en quantité de matière par sa masse en grammes ou en tonnes. Pour autant, on ne sait pas vraiment ce que sont, fondamentalement, l'énergie et la masse. Seules quelques propriétés révélées par les théories physiques du XIX^{e} et du XX^{e} siècle nous en révèlent quelques mystères.

Tout d'abord, l'énergie est conservative dans l'univers observable, c'est-à-dire qu'elle ne peut ni se créer, ni être créée, ni se détruire, ni être détruite. Elle ne peut que se transformer d'une forme d'énergie en une autre forme. Par « univers observable », j'entends ici l'accessibilité à l'observation ou à l'expérimentation ! Il existe des modèles théoriques qui visent à décrire plus complètement l'Univers que ne le font les modèles actuels de la physique, et à rendre compatibles la physique quantique et la relativité générale. Dans certains de ces modèles, l'énergie peut naître de rien, mais leur validation est pour l'instant, et peut-être pour toujours, hors de portée de toute observation et expérience. Bien qu'ils s'appuient sur la rationalité des mathématiques, ces modèles sont donc encore métaphysiques plus que physiques.

Une seconde propriété est que l'énergie est équivalente à la masse. Elle apparaît clairement dans la fameuse formule d'Albert Einstein $E=mc^2$, issue de sa théorie de la relativité restreinte publiée en 1905. Dans cette formule, c représente la vitesse de la lumière qui est constante quel que soit le référentiel depuis lequel on l'observe. E, l'énergie, et m, la masse sont donc proportionnelles et équivalentes. Ceci signifie que la masse est une forme condensée de l'énergie, et que l'on peut extraire de l'énergie à partir de la masse. C'est ce que l'on fait artificiellement au travers de la fission ou de la fusion de noyaux atomiques dans nos dispositifs industriels ou expérimentaux. Les noyaux naturels instables subissent spontanément une fission et produisent de la radioactivité naturelle. Toutes les étoiles tirent leur énergie des réactions de fusion nucléaire qui se produisent en leur cœur. La masse de matière après de telles réactions est très légèrement inférieure à la masse initiale, et une grande quantité d'énergie est ainsi libérée car c^2 est un chiffre constant très important.

La troisième propriété de l'énergie est d'être quantique, c'est-à-dire de se présenter sous forme de particules et d'avoir une limite infranchissable de fragmentation. Le quantum d'action, ou constante de Planck h, est la plus petite valeur d'énergie multipliée par la plus petite valeur de temps, ou temps de Planck. En deçà de cette valeur minimum d'énergie, une particule d'énergie ne peut plus être divisée.

L'énergie, par sa nature particulaire, ou corpusculaire, présente donc un caractère discontinu (discret).

Mais une quatrième propriété de l'énergie est de pouvoir aussi, et en même temps, adopter un caractère continu sous forme de champ. L'énergie d'un champ peut-être aisément mesurée alors que celle d'une particule quantique ne peut l'être. À l'inverse, si l'on peut déterminer la position d'une particule quantique, on ne peut déterminer celle d'un champ. La dualité champ-particule, ou onde-corpuscule, énoncée par Einstein pour la lumière au début du XX^{e} siècle, et généralisée ensuite par Louis de Broglie, contient donc en filigrane le fameux principe d'incertitude, ou d'indétermination, énoncé par Werner Heisenberg, prix Nobel de physique en 1932.

L'énergie est donc de nature différente de ce qu'elle permet de faire. On peut se servir de l'énergie, en la transformant, pour produire un travail mécanique, ou de l'électricité, ou pour favoriser certaines réactions chimiques, ou pour gravir l'Everest, ou pour remettre de l'ordre dans la chambre d'un adolescent. La nature fait exactement la même chose, mais de manière non téléologique, c'est-à-dire sans intention préalable. Les étoiles transforment l'énergie de fusion nucléaire en rayonnements. L'évaporation de l'eau liquide transforme le rayonnement thermique

du soleil en chaleur latente et en énergie gravitaire, celle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. L'énergie gravitaire de la vapeur d'eau se transforme en mouvement lorsque la pluie retombe sur les continents et que les rivières et les fleuves ramènent l'eau à l'océan. Enfin, la photosynthèse transforme l'énergie du rayonnement solaire visible en énergie chimique, celle que représentent ensemble les deux produits de la photosynthèse, les molécules organiques des êtres vivants d'une part, et les molécules d'oxygène d'autre part. Ces deux produits ne demandent qu'à réagir pour se retransformer en composés plus stables, libérant au passage l'énergie chimique qu'ils contiennent. Celle-ci peut alors être utilisée par les êtres vivants, comme c'est le cas lors de la respiration (réaction lente), ou devenir de la chaleur intense comme c'est le cas lors d'une combustion (réaction rapide).

L'énergie est le composant le plus fondamental de l'Univers au sens où il est l'essence de tous les phénomènes que nous pouvons observer, en circulant de l'un à l'autre, ou d'une entité de matière à une autre. Ses expressions sont à la fois les phénomènes et la matière, comme la lumière, les mouvements, les vibrations, les atomes, les étoiles et les êtres vivants. Comme ces expressions ne prennent leur sens qu'au regard de notre capacité d'observation, on pourrait aussi les appeler nos médiateurs de l'énergie. Il existe, peut-être, des expressions de l'énergie que nous ne connaissons pas et qui expliqueraient certains phénomènes cosmologiques à grande échelle comme l'expansion de l'Univers. Notre ignorance nous les fait appeler l'énergie sombre.

2. Le bilan énergétique de la Terre

Les phénomènes et les objets terrestres sont évidemment des expressions ou médiateurs d'énergie. Le détail de la dynamique énergétique de la terre, qu'il s'agisse des phénomènes externes ou internes, est beaucoup trop complexe pour être décrite, même sommairement. Toutefois, les flux d'énergie qui atteignent et qui quittent la Terre sous forme de rayonnements sont parfaitement mesurables et ont donc été précisément quantifiés. On appelle cela le bilan énergétique (**Figure 4.1**), ou radiatif, de la Terre. À partir de cela, on comprend mieux les quantités d'énergie mobilisées d'une part pour le fonctionnement externe de notre planète, c'est-à-dire pour le climat et la vie, d'autre part pour la tectonique des plaques et tous les phénomènes qui en découlent (volcanisme, tremblements de terre, surrection des montagnes, érosion). Je souligne ici que les phénomènes d'érosion sont à la fois dus à la

tectonique des plaques qui soulève la matière en lui donnant un potentiel d'énergie gravitaire, et au climat qui, par l'action de la pluie, de la dissolution, ou de la fragmentation par des chocs thermiques, transforme ce potentiel en mouvements de matière du « haut » vers le « bas » de la Terre.

Le flux de rayonnement solaire incident moyen qui atteint la Terre au sommet de l'atmosphère est de 340 Watts par mètre carré (W/m^2). La signification absolue de ce chiffre et des suivants importe peu ici. L'intérêt est surtout de comparer les proportions des différents flux mentionnés. Bien évidemment, le flux solaire incident varie d'un endroit à un autre, d'un moment à l'autre, et d'une saison à une autre. Il est plus faible dans les hautes latitudes qu'à l'équateur. Au cours d'une journée il augmente du lever du soleil jusqu'à zénith (midi solaire), puis diminue jusqu'à s'annuler au coucher du soleil. Au cours d'une année, le flux local varie saisonnièrement, il est plus important en été qu'en hiver. La valeur de 340 W/m^2 représente donc un flux moyen intégré sur une année au moins. C'est cette valeur que prennent en compte les modèles climatiques pour caractériser le flux d'entrée dans le bilan radiatif global de la Terre.

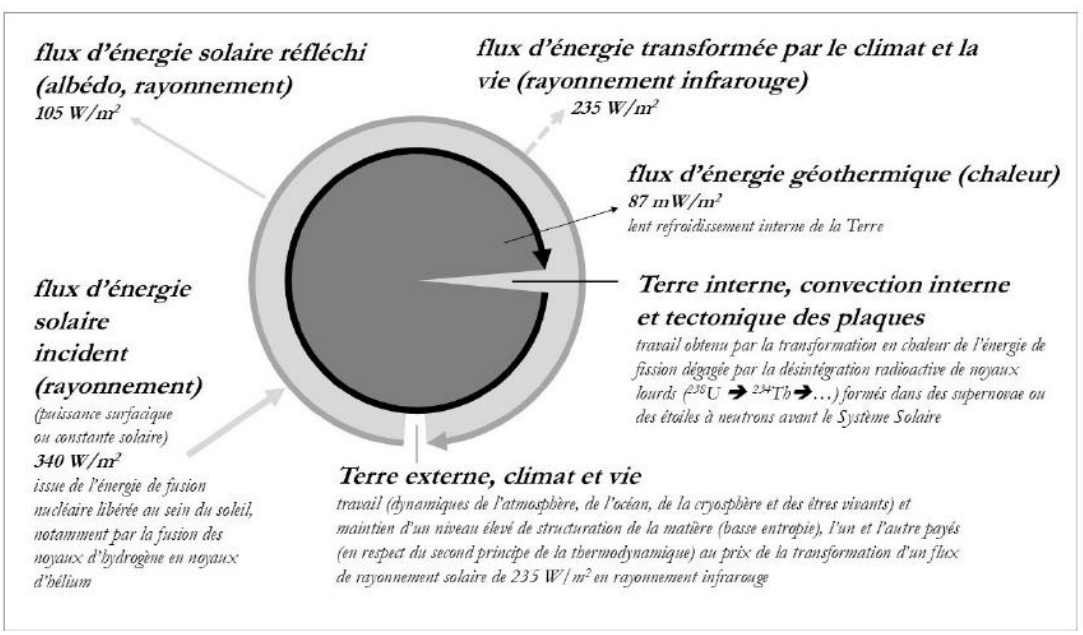
Le flux solaire incident nous apporte une énergie radiative. Sa source se trouve dans l'énergie libérée au cœur du soleil, sous forme de rayonnement ionisants et de neutrons rapides par la fusion nucléaire de noyaux d'atomes, principalement de l'hydrogène. Cette énergie se transforme au travers des interactions multiples avec la matière solaire, puis est finalement exportée vers l'espace sous forme de rayonnements de plus basses fréquences, ultraviolets, visibles, et infrarouges. La Terre reçoit donc, de la part du soleil, de l'énergie de fusion nucléaire transformée en rayonnements !

Environ un tiers du flux solaire incident, soit 105 W/m^2, est actuellement réfléchi vers l'espace par certaines surfaces de la matière terrestre, notamment les nuages et les surfaces de glace, et dans une moindre mesure par les surfaces continentales et les océans. C'est ce que l'on appelle l'albédo. L'albédo peut bien sûr varier en fonction des changements climatiques qui modifient la quantité et la nature des nuages, la surface de banquise saisonnière, l'extension des calottes glaciaires et des glaciers de montagnes, ainsi que la nature et l'extension des couverts végétaux continentaux.

La différence entre le flux incident et le flux réfléchi, soit 235 W/m^2, est donc le flux d'énergie impliqué dans les phénomènes climatiques et biologiques de la Terre. La Terre ne pouvant accumuler l'énergie au risque que sa température s'élève très vite, elle renvoie cette même quantité d'énergie vers l'espace sous forme de rayonnement

infrarouge. Au travers de cette transformation l'énergie solaire incidente perd une partie de sa structuration car, pour la même quantité d'énergie, il faut plus de photons infrarouges que de photons ultraviolets et visibles. En revanche, la Terre y a gagné en structuration, c'est-à-dire en information, celle de l'état de sa matière et de l'organisation de ses phénomènes dynamiques. Elle développe et maintient donc sa structuration dynamique en empruntant de l'ordre à l'Univers et en payant sa dette par du désordre, appelé entropie en physique. Au final, et à l'échelle de l'Univers, le second principe de la thermodynamique, qui affirme la tendance inéluctable au désordre, est respecté même si la structuration de la Terre en est une dérogation locale.

Le bilan radiatif de la Terre est l'inventaire des principaux flux d'énergie qui animent les processus terrestres. Les phénomènes du climat et de la vie sont animés par une partie du flux incident de l'énergie solaire (rayonnement), celle qui n'est pas réfléchie immédiatement vers l'espace. Le climat et la vie restituent l'énergie solaire après l'avoir transformée en rayonnement infrarouge. Les phénomènes internes de convection thermique, et leurs conséquences sur les croûtes (tectonique des plaques, volcanismes, soulèvement des continents et des montagnes, séismes…) sont animés par le flux d'énergie thermique (ou flux géothermique) issu de la désintégration radioactive de noyaux d'éléments lourds (fission nucléaire). La Terre interne se refroidit peu à peu, mais très lentement, au travers de cette émission d'énergie géothermique.


flux d'énergie solaire réfléchi (albédo, rayonnement)
105 W/m²
flux d'énergie transformée par le climat et la vie (rayonnement infrarouge)
235 W/m²
flux d'énergie géothermique (chaleur)
87 mW/m²
lent refroidissement interne de la Terre
Terre interne, convection interne et tectonique des plaques
travail obtenu par la transformation en chaleur de l'énergie de fission dégagée par la désintégration radioactive de noyaux lourds (²³⁸U ➔ ²³⁴Th➔…) formés dans des supernovae ou des étoiles à neutrons avant le Système Solaire
flux d'énergie solaire incident (rayonnement)
(puissance surfacique ou constante solaire)
340 W/m²
issue de l'énergie de fusion nucléaire libérée au sein du soleil, notamment par la fusion des noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium
Terre externe, climat et vie
travail (dynamiques de l'atmosphère, de l'océan, de la cryosphère et des êtres vivants) et maintien d'un niveau élevé de structuration de la matière (basse entropie), l'un et l'autre payés (en respect du second principe de la thermodynamique) au prix de la transformation d'un flux de rayonnement solaire de 235 W/m² en rayonnement infrarouge

3. Le flux géothermique, faible mais si important pour la vie !

Le bilan énergétique de la Terre doit être complété par le flux de chaleur qui provient des régions internes de la planète, ou flux géothermique. Celui-ci vaut en moyenne 87 millièmes de Watt par mètre carré (mW/m^2). C'est seulement 0,04 % du flux solaire incident ! Et pourtant ce petit flux est tout à fait nécessaire pour le maintien à long terme de la vie sur la Terre.

La source de l'énergie géothermique se trouve dans la radioactivité naturelle issue de la fission de noyaux lourds, par exemple ceux qui dérivent de la désintégration de l'uranium 238. Celui-ci a été formé avant le système solaire, lors de phénomènes cosmiques très énergétiques comme des explosions d'étoiles massives, appelées *supernovæ*, ou dans des objets rémanents très denses qui peuvent en résulter, comme des étoiles à neutrons. L'Uranium 238 se désintègre très lentement, au rythme d'une moitié des noyaux tous les 4,5 milliards d'année, et se transforme en un autre élément radioactif, le Thorium 234, qui se désintègre lui aussi. La chaîne de désintégration se poursuit jusqu'au Plomb 206 qui est stable. La Terre dispose ainsi d'une source d'énergie interne dont elle n'a consommé que la moitié depuis son origine il y a 4,5 milliards d'années. La tectonique des plaques terrestres se poursuivra donc encore pendant très longtemps !

Le flux d'énergie géothermique anime les mouvements des plaques tectoniques, ce qui donne lieu aux activités volcaniques et aux soulèvements des chaînes de montagnes. En quoi la tectonique des plaques terrestre est-elle nécessaire à la vie ? Elle crée d'abord une topographie de la surface solide de la Terre avec des creux topographiques où des océans se forment sous l'influence de l'attraction gravitaire. Par ailleurs des bosses topographiques existent dont les parties les plus hautes sont émergées et forment les continents et les montagnes. Si la surface solide de la Terre était parfaitement sphérique, notre planète serait uniformément recouverte d'un océan. Cela aboutirait à un piégeage des nutriments nécessaires à la vie dans les sédiments. Le potentiel nutritif de la Terre se réduirait alors aux nutriments dissous recyclés par les métabolismes bactériens profonds, et ramenés en surface par les courants de convection océaniques. Il n'est pas certain que de telles conditions auraient permis à une vie réduite de se maintenir depuis son origine, il y a quelques 4 milliards d'années, jusqu'à notre présent. Mais la tectonique terrestre amplifie considérablement le potentiel nutritif de notre planète en recyclant les sédiments

eux-mêmes. En effet, là où des plaques océaniques affrontent des plaques continentales, les premières passent en dessous des secondes. C'est le phénomène de subduction. La matière correspondante, composée de la croûte océanique et des sédiments hydratés qu'elle porte, fusionne dans le manteau. Les nutriments sédimentaires sont ensuite remis à la disposition de l'atmosphère, des surfaces continentales et des océans par les éruptions volcaniques liées aux zones de subduction. Un autre recyclage passe par l'érosion des continents et des chaînes de montagnes car ceux-ci contiennent aussi des sédiments anciens qui ont accumulé des nutriments. Finalement, dans la longue histoire de la Terre, tous les nutriments accumulés dans les sédiments ont été recyclés de nombreuses fois, avec une période géologique qui dépend des océans, mais dont la moyenne globale est imposée par les fluctuations de l'activité tectonique de la Terre. Elle est en moyenne de 70 millions d'années depuis le début de l'ère Primaire, c'est-à-dire depuis environ 540 millions d'années, mais elle a probablement été plus courte dans les phases plus anciennes. Ce phénomène dure depuis la formation des premiers océans il y a 4,4 milliards d'années.

4. L'énergie chimique accumulée, un des secrets de la Terre

Tous les êtres vivants ont besoin d'énergie pour se développer, se mouvoir, préserver leur chaleur corporelle, et se reproduire. Et tous tirent cette énergie de la respiration, c'est-à-dire en faisant réagir l'oxygène avec de la nourriture. Certains, les végétaux, ont la capacité de fabriquer eux-mêmes leur nourriture grâce à la photosynthèse. D'autres, animaux et bactéries, utilisent les corps d'autres êtres vivants pour se nourrir et respirer. Certains autres enfin ne supportent pas l'oxygène mais, bien à l'abri dans des milieux anoxiques, ils respirent d'autres oxydants comme les sulfates ou les nitrates, dont le recyclage dépend néanmoins de l'oxygène.

L'oxygène est intrinsèquement un élément peu stable. Il tend donc à se combiner avec de nombreux autres éléments en formant des composés, des oxydes, qui sont chimiquement plus stables que lui-même. Pour réaliser cela, l'oxygène déstructure en général des composés moins stables que les oxydes qu'il va former. Ce sont ses proies chimiques. Le résultat est donc une transformation des composés moins stables en des composés plus stables en libérant de l'énergie. Celle-ci était auparavant contenue, sous forme potentielle d'énergie chimique, dans la coexistence de l'oxygène et de ses proies chimiques. La Terre actuelle dispose d'un énorme réservoir d'énergie

chimique au travers de l'existence d'un stock d'oxygène (O_2, peu stable) dans l'atmosphère et les océans, et de l'existence d'une très grande quantité de matière organique (formule générique CH_2O, peu stable) susceptible d'être facilement oxydée en formant du dioxyde de carbone (CO_2, stable) et de l'eau (H_2O, stable). Il est étonnant qu'un tel réservoir d'énergie chimique se soit constitué puisque c'est précisément une dualité de composés chimiques susceptibles de réagir rapidement les uns avec les autres. En fait, ce réservoir s'est constitué peu à peu sur plusieurs milliards d'années parce qu'une petite partie du flux de matière organique produite par la photosynthèse a été mise hors de portée de l'oxygène, dans les sédiments océaniques (**Figure 4.2**). De ce fait, l'oxygène, également produit par la photosynthèse, s'est trouvé en pénurie de proies chimiques, et n'a pas pu être entièrement consommé par les réactions d'oxydation de la matière organique. Bien que très peu stable, il s'est ainsi progressivement accumulé dans nos milieux de vie, l'air et l'eau. Son pendant est l'existence d'un énorme stock de matière organique sédimentaire ayant échappé à l'oxydation, au fond des océans, dans notre sous-sol ou dans les strates sédimentaires des montagnes. Pour autant, l'oxygène accumulé est instable par nature. Il ne se maintient que de manière stationnaire, parce que sa production moyenne par la photosynthèse compense sa consommation moyenne par les réactions d'oxydation. Il est à la disposition permanente de tous les êtres vivants pour respirer et assouvir leurs besoins bioénergétiques.

Il y a plus de 2,5 milliards d'années, l'évolution adaptative des espèces a fait émerger un premier grand métabolisme bioénergétique, la photosynthèse, capable d'utiliser l'énergie solaire pour convertir de l'eau et du gaz carbonique en molécules organiques et en oxygène. Bien que très peu stable, l'oxygène s'est lentement accumulé dans les environnements et a progressivement constitué, avec la biomasse vivante, un réservoir d'énergie chimique environnementale qui a largement guidé l'évolution ultérieure de la vie terrestre. Cette évolution s'est d'abord traduite par l'émergence de la respiration, autre grand métabolisme bioénergétique qui utilise l'énergie chimique accumulée, c'est-à-dire une forme secondaire de l'énergie solaire. L'énergie de respiration apporte aux êtres vivants leurs capacités de se développer, de s'autoréguler, de se mouvoir, et de se reproduire. Chez les animaux, la respiration requiert la captation de proies végétales ou animales. Chez les bactéries non photosynthétiques, elle requiert la consommation de cadavres ou de détritus. Chez les plantes ou les macro-algues, elle utilise la matière organique produite grâce à leur capacité de photosynthèse.

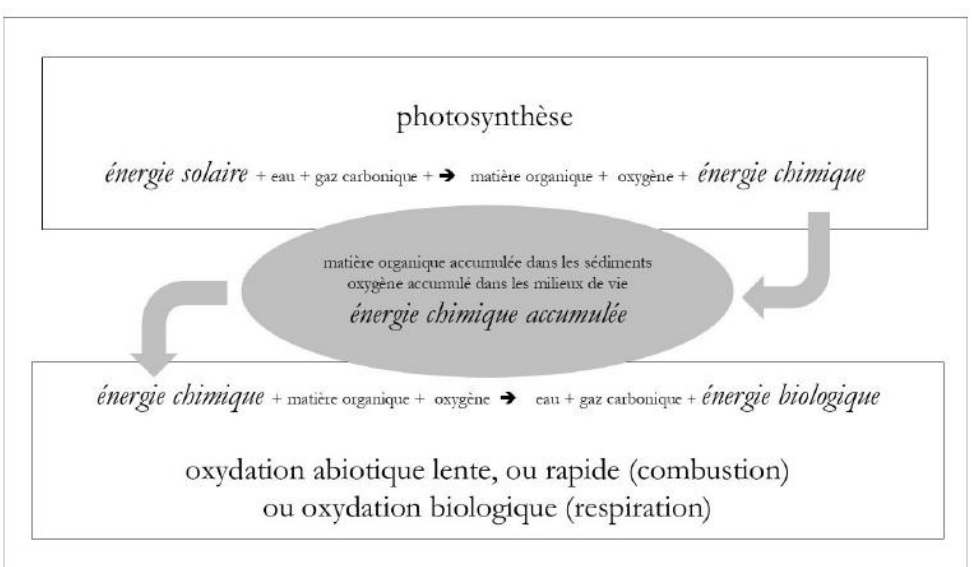
L'apparition de nombreuses sophistications évolutives de la vie, les cellules symbiotiques (eucaryotes, végétales et animales), l'anatomie des végétaux (taille, feuilles, houpier...), les poumons et les systèmes cardiovasculaires et digestifs des animaux, ont ensuite été guidées par la recherche de l'optimisation de ces deux grands métabolismes.

La réserve d'énergie chimique n'a pas été limitée aux milieux de vie déjà occupés par des êtres vivants. Au travers des courants, des turbulences, et des phénomènes de diffusion moléculaire, l'oxygène s'est bien évidemment réparti dans la totalité de l'atmosphère, et dans la quasi-totalité des océans terrestres à l'exception des zones peu accessibles aux courants profonds. Chaque incursion diffusive de populations bactériennes dans les milieux non encore habités constituait dès lors un nouvel environnement habitable pour les êtres vivants dotés de la capacité de respirer. L'oxygène y était présent et la biomasse bactérienne colonisatrice y devenait la source nutritive. Une occupation maximum des milieux terrestres s'est ainsi mise en place.

Sur les surfaces continentales, qui étaient stériles il y a encore 500 millions d'années, la colonisation par des populations bactériennes pionnières a permis à certains animaux et végétaux de « sortir de l'eau », créant ainsi de nouveaux écosystèmes proches des rivages, et ouvrant la porte à l'occupation maximum des espaces continentaux.

En outre, l'existence du stock environnemental d'énergie chimique assure la poursuite de la vie locale là où les conditions deviennent temporairement défavorables. Par exemple, dans les zones de hautes latitudes, l'éclairement

La photosynthèse biologique transforme des composés stables, l'eau (H_2O) et le gaz carbonique (CO_2), en composés instables, la matière organique (formule générique CH_2O) et l'oxygène (O_2) en utilisant l'énergie solaire incidente (rayonnement). Le couple matière organique-oxygène est instable en raison de la propension des deux composés à réagir ensemble, et il est donc intrinsèquement porteur d'une énergie chimique, celle qui est dégagée lors de l'oxydation de la matière organique par l'oxygène. Suivant les conditions physico-chimiques, celle-ci peut se produire lentement ou rapidement comme dans une combustion. La tendance naturelle est que la matière évolue vers les composés les plus stables et que, en conséquence, l'énergie chimique soit rapidement transformée en chaleur (énergie thermique). Mais dans les conditions terrestres, un énorme stock d'énergie chimique produite par la photosynthèse a pu être accumulé au cours du temps, en isolant une petite partie du flux de matière organique sous forme de matière organique sédimentaire fossile, la préservant ainsi de son agression par l'oxygène. Par voie de conséquence, un stock d'oxygène s'est constitué par défaut de proies chimiques. Dans ce nouvel environnement, l'évolution adaptative de la vie a tiré profit de l'énergie chimique accumulée au travers de l'émergence de la respiration, c'est-à-dire d'une oxydation de matière organique sous médiation biologique. Presque tous les êtres vivants utilisent ainsi l'énergie chimique accumulée pour assouvir leurs besoins énergétiques, d'autant que celle-ci est présente même lorsque, temporairement, le rayonnement solaire est absent et que la photosynthèse ne peut donc se produire.


photosynthèse
énergie solaire + eau + gaz carbonique + ➔ matière organique + oxygène + énergie chimique
matière organique accumulée dans les sédiments
oxygène accumulé dans les milieux de vie
énergie chimique accumulée
énergie chimique + matière organique + oxygène ➔ eau + gaz carbonique + énergie biologique
oxydation abiotique lente, ou rapide (combustion)
ou oxydation biologique (respiration)

solaire est très faible en hiver, voire nul, et la photosynthèse n'y est donc pas possible pendant de long mois. C'est alors la réserve environnementale d'énergie chimique qui permet seule à la vie de subsister en attendant le retour printanier de la lumière.

CHAPITRE 5

La Terre et l'habitabilité évolutive

1. Partout où la vie est possible, mais à chacun son habitabilité !

Les chapitres précédents ont décrit comment la matière terrestre s'est structurée, c'est-à-dire comment elle a accumulé et maintenu une gigantesque quantité d'information sous l'effet des flux d'énergie qui la traversent en se modifiant depuis 4,5 milliards d'années.

Dans les conditions héritées de la formation de l'Univers et du système solaire, la structuration précoce de la matière terrestre a permis d'établir quelque part une première habitabilité, c'est-à-dire un jeu de conditions rendant possible l'émergence de la vie. Je qualifie ces conditions d'objectives car elles ne dépendent pas des êtres vivants par eux-mêmes, mais de la possibilité physico-chimique de construire un métabolisme primitif, autoréplicatif, et de maintenir les molécules impliquées dans une gamme de température préservant leur stabilité. En bref, il s'agit sur la Terre de la présence d'eau liquide, d'une gamme de température n'excédant pas 100 ou 120 °C, et de la disponibilité de ressources nutritives.

Mais, au-delà de l'émergence de la vie, la matière vivante a poursuivi sa structuration de manière évolutive, c'est-à-dire adaptative. Les conséquences furent immenses pour l'habitabilité de la Terre, car d'objectives, les conditions sont devenues subjectives. Pour chaque être vivant, tel milieu de vie était habitable ou ne l'était pas, ou l'était plus ou moins. Et chaque étape d'adaptation des espèces permettait de rendre plus habitable un milieu, ou d'en rendre un autre simplement habitable alors qu'il ne l'était pas auparavant. L'extension de la sphère habitable terrestre a donc tenu à l'adaptation évolutive des espèces vivantes. En d'autres termes, si le jeu limité des conditions objectives d'habitabilité est nécessaire à tout être vivant, il ne permet pas de circonscrire la sphère habitable de la planète. Celle-ci dépend des habitants eux-mêmes, c'est-à-dire de la capacité évolutive et adaptative de leurs espèces.

Chaque milieu habitable est aujourd'hui habité par des espèces qui s'y sont adaptées, où les individus de chaque espèce peuvent non seulement survivre, mais croître et se reproduire. Certaines aptitudes à la survie, comme l'hibernation pour l'ours, voire l'aptitude à supporter des états congelés comme celle du tardigrade, ne sont que des aptitudes acquises par l'espèce au fil des générations dans le cadre de l'évolution adaptative, par sélection naturelle. Il faut faire remarquer ici que certaines populations d'animaux vivant aujourd'hui dans des milieux extrêmes, comme les sources hydrothermales au fond des océans, sont des populations colonisatrices adaptées mais dont l'origine est ailleurs. Elles ne sont pas la droite filiation d'une vie précoce qui aurait émergé dans de tels milieux. L'émergence de la vie fait l'objet de diverses hypothèses, l'origine hydrothermale étant l'une d'entre elles. Si cette hypothèse était confirmée, cela signifierait que la vie émergente, constituée d'êtres vivants unicellulaires, et à cellules très simples, se serait exportée vers d'autres milieux où elle se serait diversifiée. Ce n'est que beaucoup plus tard que certains de ces organismes évolués seraient revenus coloniser les sources hydrothermales en gardant les grands traits de leurs morphologies fonctionnelles acquises (vers, mollusques, crustacés, céphalopodes...). Localement, ces animaux colonisateurs profitent de la présence de bactéries qui produisent de la matière organique par chimiosynthèse, c'est-à-dire en utilisant l'énergie chimique locale de ces milieux particuliers. Ces bactéries font partie de l'arbre phylogénétique du vivant et partagent donc un lointain ancêtre commun avec tous les autres êtres vivants. On ne sait toutefois pas encore si ces bactéries sont, elles aussi, adaptées ou si elles vivent dans leur milieu d'origine en droite ligne de l'émergence de la vie.

Si l'on déplace instantanément les êtres vivants hors du milieu auquel ils sont adaptés, leur mort est en général assurée. Certains peuvent éventuellement se placer en mode de survie, en se mettant sous des formes latentes, par exemple congelée ou déshydratée, pour attendre des jours meilleurs. D'autres émettent des éléments reproductifs (œufs) capables de traverser des nombreuses conditions défavorables (températures, sécheresses) en attendant aussi le retour de jours meilleurs. Dans ce dernier cas, c'est de la survie de l'espèce et non de l'organisme individuel dont il est question.

Grâce à cette prodigieuse capacité adaptative, la vie a pu s'installer partout où elle était objectivement possible, même si les conditions étaient très éloignées de celles de son émergence.

2. Les conditions objectives d'habitabilité, requises par tous les êtres vivants

Quelques conditions sont strictement nécessaires à l'existence de chaque être vivant depuis l'émergence de la vie, quelle que soit son adaptation ultérieure. Ce sont les conditions objectives d'habitabilité. La stabilité chimique des molécules organiques ne permet pas aux organismes vivants d'exister au-delà d'environ 120 °C. Quelques bactéries, dites hyperthermophiles, peuvent encore survivre à cette température, mais leur métabolisme et leur reproduction, par division cellulaire, s'exercent à des températures un peu inférieures. Par ailleurs, tous les êtres vivants ont besoin d'eau liquide, ce qui implique que la température d'un milieu de vie à la surface de la Terre actuelle doit être supérieure à 0 °C pour l'eau douce, ou d'environ −2 °C pour l'eau de mer. Certes, l'ours polaire peut parfaitement s'accommoder de températures de −30 ou −40 °C, mais il ne peut s'en accommoder que parce que la réserve énergétique de son corps a été accumulée grâce à sa nourriture. Or l'ours polaire est un prédateur dont la proie favorite est le phoque qui lui, se nourrit sous la banquise, dans l'eau liquide, à partir de poissons et de crustacés, eux aussi dépendants de l'eau liquide, et d'une ressource nutritive aquatique primaire, le plancton marin. On voit dans cet exemple qu'une condition objective d'habitabilité est l'existence d'une ressource nutritive, et que celle-ci ramène toujours à l'existence de l'eau liquide. L'eau liquide est nécessaire à tous les êtres vivants, pour eux-mêmes ou pour leurs ressources nutritives, et aucun d'entre eux ne peut en être éloigné durablement. La gamme de températures dans laquelle la vie des êtres vivants terrestre est durablement possible se situe donc *grosso modo* entre 0 et 100 °C. Certaines adaptations permettent toutefois à des êtres vivants de se contenter de très peu. Dans des milieux secs tels les déserts arides, des insectes ou des reptiles profitent de phénomènes physiques temporaires comme la condensation matinale de gouttes de rosée à partir du faible contenu de l'air en vapeur d'eau.

L'habitabilité objective de la Terre signifie donc que de l'eau liquide et des ressources nutritives doivent être présentes, au moins quelque part et au moins temporairement. Si ces conditions sont temporaires, la fréquence de leur occurrence détermine la possibilité ou non pour des êtres vivants de s'y adapter. On imagine aisément qu'un organisme pluricellulaire, tels qu'un ours ou un chameau, puisse faire des réserves de graisse ou d'eau en attendant la prochaine proie, ou la prochaine oasis. Mais telle n'est pas la situation d'une simple bactérie qui ne peut supporter plusieurs jours de sécheresse absolue.

Enfin, une condition objective d'habitabilité, moins intuitive, est l'existence d'un substrat solide. Il faut bien en effet que les êtres vivants continentaux puissent s'enraciner ou se déplacer sur une surface solide, et il faut bien que les océans où évoluent les êtres vivants marins reposent sur une surface solide. La Terre est une planète tellurique, c'est-à-dire constituée majoritairement de matériaux rocheux. Sa surface, en dehors des océans et de l'atmosphère, est constituée de croûtes solides refroidies, océaniques ou continentales, éventuellement recouvertes par des sédiments, solides également. Je mentionne en outre que, au-delà des aspects de support physique, le substrat solide minéral a pu également servir de catalyseur lors des premiers stades précurseurs de la vie, ceux des systèmes chimiques autoréplicatifs prébiotiques. Cette hypothèse est une voie de recherche prometteuse qui fait l'objet d'expérimentations en laboratoire.

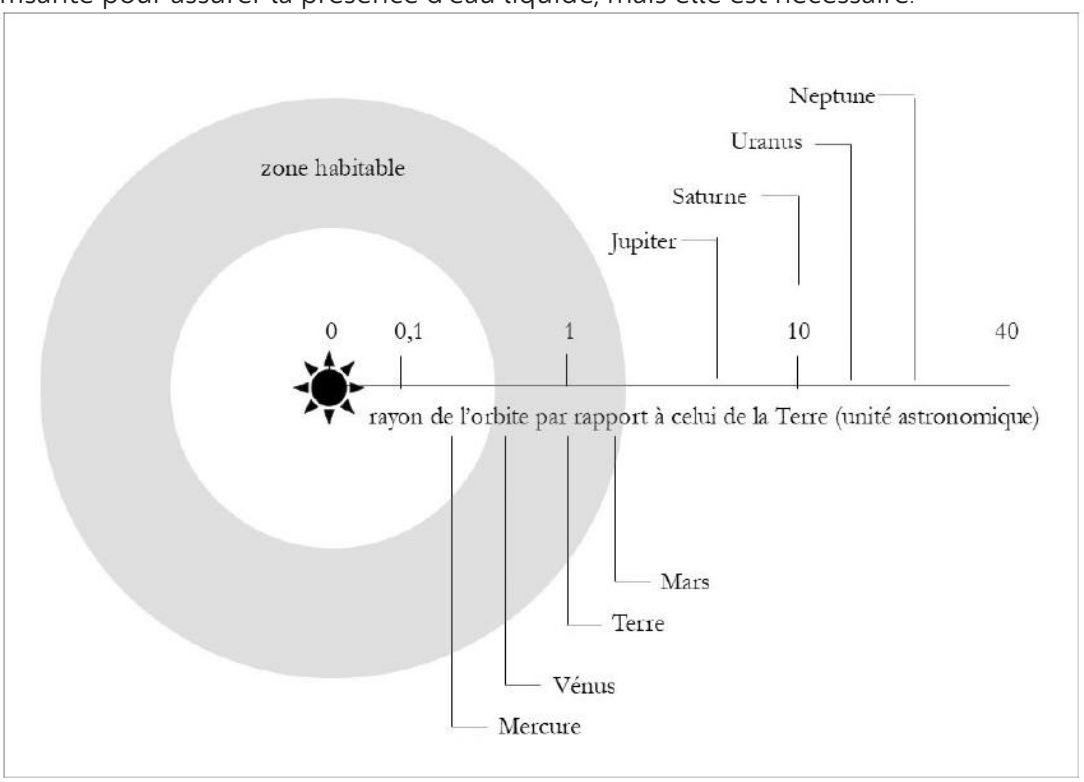
3. Les conditions dynamiques héritées de la formation du système solaire

Une planète tellurique comme la Terre ne peut se constituer que dans un univers où la matière dispose déjà d'une grande diversité chimique, ce qui suppose que des réactions de fusion nucléaire se sont produites au sein d'étoiles de générations antérieures. Ce sujet a été abordé dans le chapitre 1. En partant de ce pré-acquis, l'habitabilité objective de la Terre requiert un certain nombre de conditions préalables, nécessaires quoique non suffisantes, dont certaines sont héritées des conditions de sa formation, d'autres acquises lors de son évolution précoce.

La première de ces conditions est que son orbite la maintienne dans la zone dite habitable de son système stellaire (**Figure 5.1**), celle où la présence d'eau liquide est potentiellement possible, c'est-à-dire ni trop près ni trop loin de l'étoile compte tenu de la masse et de l'âge de celle-ci. Dans le système solaire actuel, l'orbite de la Terre est la mieux placée, la Terre est donc la planète potentiellement la plus habitable de ce système. Mercure est beaucoup trop près du Soleil, la chaleur et la perte de son atmosphère y ont empêché l'eau liquide de se former. L'orbite de Vénus se situe sur le bord interne de la zone habitable. Si l'eau liquide y a existé au début de son existence, elle n'a pu se maintenir à long terme et s'est rapidement évaporée, ce qui a précipité sa perte en raison des phénomènes de dissociation photochimique de la molécule d'eau, et d'échappement gravitaire de l'hydrogène dans la haute atmosphère.

Mars est en orbite en limite externe de la zone habitable du système solaire. Il est possible, voire probable, que de l'eau liquide ait été présente à sa surface au début de son histoire. Malheureusement, la planète n'a retenu qu'une atmosphère très peu dense ce qui a finalement provoqué l'évaporation totale de l'eau liquide et la perte quasi-totale du stock d'eau. Vénus et Mars ont donc, toutes les deux, perdu leur eau, mais *via* deux causes physiques différentes. L'eau liquide s'est évaporée de la surface de Vénus sous l'effet d'une température trop élevée, alors qu'elle s'est évaporée de la surface de Mars sous l'effet d'une pression atmosphérique trop basse. Dans les deux cas, le destin ultime de la vapeur d'eau fut de se dissocier chimiquement sous l'effet des rayonnements solaires de haute énergie (ultraviolets) et de donner lieu à l'échappement gravitaire de l'hydrogène. Il semble donc que la Terre ait eu une chance immense d'avoir pu maintenir ses océans depuis 4,4 milliards d'années, c'est-à-dire un stock d'eau sous un état protégé, l'état liquide.

L'orbite de la Terre autour du Soleil n'est pas tout à fait circulaire, elle est une ellipse très peu allongée. Pour autant, la distance de la Terre au Soleil reste toujours dans ce que l'on appelle la zone habitable, c'est-à-dire une zone où la présence d'eau liquide à la surface d'une planète est potentiellement possible. Ce n'est pas une condition suffisante pour assurer la présence d'eau liquide, mais elle est nécessaire.



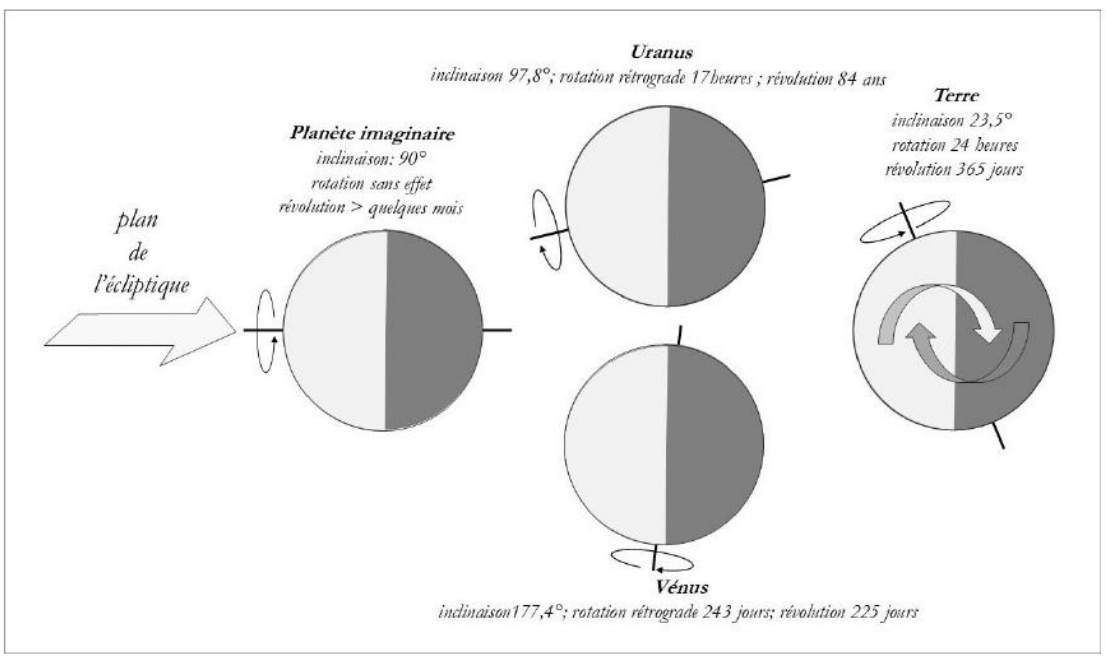
D'autres objets du système solaire sont parfois présents dans la zone habitable, mais ne le sont que de manière transitoire car leur orbite est très allongée. C'est le cas des comètes qui, périodiquement, sortent des confins du système solaire, se rapprochent considérablement de l'étoile pour en faire le tour, puis repartent très loin, là où nos instruments d'observation ne permettent pas de les suivre, mais toujours dans le champ gravitaire du Soleil. Au cours de leur périple, les comètes traversent la zone habitable. Toutefois, ce sont généralement de petits objets en comparaison des planètes. Elles ne retiennent autour d'eux qu'une infime pression de gaz, trop faible pour que de l'eau liquide puisse se maintenir à leur surface, même transitoirement, pendant les quelques jours ou semaines de traversée de la zone habitable. Certains chercheurs ont toutefois avancé l'hypothèse que des poches confinées d'eau liquide sur des comètes pourraient être le siège de la formation de molécules organiques. Lorsque les comètes repartent vers les zones froides du système solaire, l'eau se transforme en glace ce qui préserve l'intégrité des molécules organiques synthétisées jusqu'au cycle suivant. Les aléas des mouvements orbitaux font que, de temps à autre, une comète s'écrase sur une planète. Si les éventuelles molécules organiques qu'elle contient survivent à l'impact, elles serviraient alors de source d'ensemencement pour la chimie prébiotique de certaines planètes telles la Terre. Quoi qu'il en soit, porteuses ou non de briques de la chimie prébiotique, les comètes ne sont pas des objets cosmiques habitables.

Une autre condition du mouvement planétaire est un préalable nécessaire à l'habitabilité objective. Il faut que le flux du rayonnement de l'étoile soit réparti sur la surface de la planète. En effet, si la surface d'un hémisphère est exposée trop longtemps, un climat aride et brûlant s'y met en place, impropre à la vie, tandis que la surface de l'autre hémisphère se trouve plongée dans l'obscurité et soumise à un climat glacé, également impropre à la vie (**Figure 5.2**). De telles conditions peuvent s'exercer sur des planètes situées dans la zone habitable de leur étoile mais à vitesse de rotation très lente ou dont l'axe de rotation se situe quasiment dans le plan de leur orbite autour du Soleil, appelé plan de l'écliptique. Dans le système solaire c'est le cas de Vénus qui a une vitesse de rotation très lente car il lui faut plus de temps pour faire un tour sur elle-même que pour parcourir son orbite autour du Soleil. Toutefois, si Vénus n'est pas habitable aujourd'hui, c'est surtout à cause de l'énorme effet de serre induit par son épaisse atmosphère. Uranus a un axe de rotation très incliné et proche du plan de l'écliptique. Mais si Uranus n'est pas habitable, c'est surtout parce que son orbite est très éloignée de la zone habitable du système solaire.

La rotation de la Terre sur elle-même se fait aujourd'hui en 24 heures, autour d'un axe incliné d'environ 23,5° par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique. Une telle rotation répartit régulièrement le flux de rayonnement solaire sur l'ensemble de la surface terrestre, à l'exception des zones polaires. Aux latitudes inférieures à 23,5° aucune zone n'est exposée de manière prolongée au rayonnement solaire, ni plongée durablement dans l'obscurité. Les zones polaires sont quant à elles soumises à une alternance saisonnière entre une nuit hivernale permanente et un jour estival permanent. L'intérieur du continent antarctique est inhabitable car la température est trop basse pour qu'existe de l'eau liquide, même en été austral. Toutefois, la périphérie marine et littorale de ce continent est habitée par des flores et des faunes adaptées car elle bénéficie de la continuité écologique de l'océan Austral. L'océan Arctique occupe la zone polaire septentrionale. Il est recouvert d'une banquise permanente dont l'extension varie saisonnièrement. La banquise arctique résiduelle d'été tend actuellement à disparaître en raison du réchauffement climatique. Sous la banquise, en hiver comme en été, l'eau liquide sous-jacente permet à des populations animales adaptées de se maintenir en utilisant le stock d'énergie chimique.

La position orbitale et les caractéristiques de rotation d'une planète sont un héritage cosmique aléatoire qui résulte de l'accrétion de cette planète dans le disque stellaire, et de certains impacts majeurs, également aléatoires, survenus à la fin de cette accrétion. Dans le cas de la Terre, un impact géant entre deux planètes en formation, Gaia d'une taille légèrement inférieure à la Terre, et Théia de la taille de Mars, a donné naissance au duo Terre-Lune. Dans cet impact, Théia a complètement disparu, mais le nuage de matière expulsée s'est finalement recondensé dans l'accrétion de Gaia, pour former la Terre, et dans celle d'un satellite naturel de la Terre, notre Lune. L'inclinaison de l'axe et la vitesse de rotation de la Terre sont, au moins partiellement, des conséquences dynamiques de cet impact. Le rapport de la masse de la Lune à celle de la Terre vaut 1/81. C'est le rapport satellite/planète le plus

Selon les conditions de leur formation, les planètes ont des mouvements de rotations différents. Ceux-ci se différencient notamment par l'inclinaison de l'axe de rotation par rapport au plan de l'écliptique, et par la vitesse de rotation. La meilleure distribution du rayonnement solaire a lieu pour un axe de rotation perpendiculaire au plan de l'écliptique et pour une vitesse de rotation de l'ordre du jour terrestre. Le mouvement de la Terre est proche de ces conditions. Il assure donc une bonne répartition du rayonnement solaire qui évite des variations thermiques excessives et des situations locales peu habitables ou inhabitables.



important du système solaire. De ce fait, la Lune joue depuis son origine un rôle de stabilisateur de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre. Cette inclinaison varie, mais modérément, entre 22 et 25°.

La Terre est située dans la zone habitable du système solaire, ce qui est une condition nécessaire mais pas suffisante pour assurer la présence d'eau liquide. En répartissant le flux du rayonnement solaire, la rotation de la Terre évite que sa surface soit excessivement chauffée ou gelée pendant de longues périodes, ce qui est une condition supplémentaire, également nécessaire, quoique non suffisante, à la présence d'eau liquide.

Les caractéristiques du mouvement de la Terre ont été nécessaires à son habitabilité primitive, et sont toujours nécessaires à son habitabilité actuelle. Mais l'habitabilité de la Terre est modulée par les variations des caractéristiques orbitales et de rotation qui modifient la répartition du flux solaire (**Figure 5.3**). Elles provoquent ainsi des variations naturelles du climat terrestre dont dépend l'extension ou la contraction des surfaces habitables. Les cycles naturels du climat que la Terre a connu depuis plusieurs millions d'années, entre des phases glaciaires et des phases interglaciaires sont des conséquences des faibles variations de son orbite et de sa rotation.

L'orbite de la Terre autour du Soleil est une ellipse peu allongée, mais dont l'allongement, que l'on appelle l'excentricité, varie de manière cyclique avec des périodes de 100 000 et de 413 000 ans environ. En conséquence, la variation saisonnière de la distance Terre-Soleil est amplifiée ou réduite, ce qui modifie la saisonnalité globale du flux solaire.

L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre varie également avec une période d'environ 41 000 ans, ce qui signifie que le contraste saisonnier peut être plus ou moins marqué, d'autant plus s'il se conjugue avec les conditions d'excentricité.

Enfin, l'orientation de l'axe de rotation se modifie, tel celui de l'axe d'une toupie en mouvement, ce qui modifie les conditions saisonnières par rapport à l'orbite elliptique de la Terre, dont le soleil occupe l'un des foyers. De ce fait, un hémisphère peut se trouver en été lorsque la Terre est la plus proche du soleil, mais aussi lorsque la Terre est la plus loin du Soleil. Ces conditions changeantes sont celles dites de la précession des équinoxes. Elles modulent le flux solaire saisonnier, donc l'intensité des saisons. Elles varient avec deux périodes d'environ 19 000 et 23 000 ans.

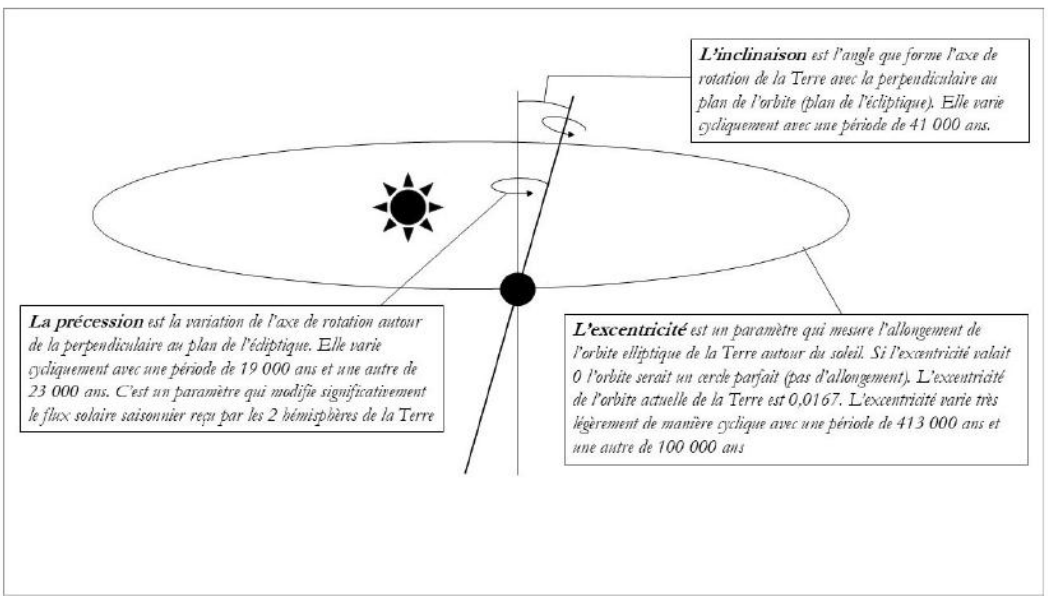
Alternances entre phases glaciaires et phases interglaciaires – la théorie astronomique des climats

Une phase climatique dite glaciaire désigne un épisode pendant lequel les glaces continentales s'accumulent au détriment des surfaces continentales habitables, jusqu'à un maximum glaciaire comme celui qui s'est produit il y a environ 20 000 ans. Le volume de glace s'accumule aux dépens du volume d'eau de mer, ce qui signifie que le niveau des océans baisse pendant les phases glaciaires. À l'inverse, une phase dite interglaciaire désigne un épisode de réchauffement pendant lequel les glaces continentales fondent jusqu'à un minimum. Ce phénomène libère des surfaces continentales habitables mais transfère aussi des surfaces continentales habitables au domaine marin en raison de la hausse du niveau marin.

L'étude de la relation entre les cycles du mouvement de la Terre et les variations du flux solaire à sa surface a donné lieu à la théorie astronomique des climats qui explique les alternances glaciaire-interglaciaire des climats récents. Milutin Milanković en fut le pionnier et cette théorie fut ensuite affinée par André Berger et son équipe à l'Université catholique de Louvain.

Ces variations cycliques de l'intensité et de la répartition du flux solaire se sont produites au cours de toute l'histoire de la Terre. Néanmoins, leurs effets climatiques ont pu être différents selon la position géographique des continents et des océans car celle-ci se modifie sous l'action de la tectonique des plaques. Par exemple, depuis quelques dizaines de millions d'années, les surfaces continentales se trouvent majoritairement dans l'hémisphère nord. Par ailleurs le détroit qui sépare l'Amérique du Sud de la péninsule Antarctique (passage de Drake) s'est ouvert il y a quelques dizaines de millions d'années, et l'isthme de Panama s'est fermé il y a environ 13 millions d'années. Ce contexte géographique et géophysique a été favorable à la mise en place d'un mode climatique de type « glacière » (*icehouse*) qui, depuis 2 à 3 millions d'années, se traduit par des alternances entre des phases glaciaires avec une forte accumulation de glace sur les continents de l'hémisphère nord et des phases interglaciaires pendant lesquelles la glace se retire.

Les caractéristiques du mouvement orbital de la Terre autour du soleil et de sa rotation sur elle-même se modifient de manière cyclique. Ces variations induisent des changements dans l'intensité et la répartition du flux solaire à la surface de la Terre, ce qui provoque des variations naturelles cycliques du climat.


L'inclinaison est l'angle que forme l'axe de rotation de la Terre avec la perpendiculaire au plan de l'orbite (plan de l'écliptique). Elle varie cycliquement avec une période de 41 000 ans.
La précession est la variation de l'axe de rotation autour de la perpendiculaire au plan de l'écliptique. Elle varie cycliquement avec une période de 19 000 ans et une autre de 23 000 ans. C'est un paramètre qui modifie significativement le flux solaire saisonnier reçu par les 2 hémisphères de la Terre
L'excentricité est un paramètre qui mesure l'allongement de l'orbite elliptique de la Terre autour du soleil. Si l'excentricité valait 0 l'orbite serait un cercle parfait (pas d'allongement). L'excentricité de l'orbite actuelle de la Terre est 0,0167. L'excentricité varie très légèrement de manière cyclique avec une période de 413 000 ans et une autre de 100 000 ans

Nous sommes actuellement, depuis environ 10 000 ans, dans une phase interglaciaire d'un mode climatique « glacière », car les étés de l'hémisphère nord ont fait fondre davantage de glace que les hivers n'en ont accumulée par les précipitations de neige. Ces alternances glaciaire-interglaciaire se produisent avec des périodicités emboîtées qui répondent aux périodicités du mouvement orbital et de rotation de la Terre.

4. Des propriétés complémentaires acquises au début de l'histoire de la Terre

À la fin de sa formation, il y a 4,5 milliards d'années la surface de la Terre était beaucoup trop chaude pour permettre des accumulations d'eau liquide, même sous forme restreinte et localisée (mares, lacs, océans embryonnaires). Ce n'est qu'après 100 millions d'années d'un premier refroidissement, il y a environ 4,4 milliards d'années, que les premiers océans se formèrent. La présence des premiers océans a été décelée à partir de l'étude géochimique et isotopique de minéraux très anciens (4,4 milliards d'années), des zircons, présents dans des roches sédimentaires elles aussi très anciennes (3,5 milliards d'années) du site de Jack Hills en Australie. Bien que la température fût encore très élevée, probablement supérieure à 200 °C, une pression atmosphérique beaucoup plus importante que celle d'aujourd'hui, rendit possible la condensation de la vapeur d'eau. Les premiers océans étaient donc chauds, très chauds ! Trop chauds pour l'émergence de la vie ! En effet, au-delà de 100 ou 120 °C, beaucoup de molécules organiques nécessaires à la constitution de systèmes chimiques prébiotiques, puis de cellules vivantes primitives, sont thermiquement détruites. La première habitabilité terrestre requerrait dont encore une réduction importante de cette température.

L'apparition précoce des océans terrestres changea rapidement la donne en instaurant un système physico-chimique capable de transférer de la matière entre son état gazeux, dans l'atmosphère, et son état solide, dans les sédiments. Ce mécanisme est décrit en détails dans le chapitre 2.

Si les premiers océans s'accumulèrent à une température de 200 °C ou plus, c'est sans doute à cause d'une croûte terrestre encore très chaude, mais aussi, et peut-être surtout, à cause d'un effet de serre considérable. Celui-ci était dû à une atmosphère bien plus dense que celle d'aujourd'hui et composé à plus de 98 % de gaz carbonique.

C'est la situation de Vénus actuellement, dont la température au sol approche même les 500 °C, probablement parce que son orbite est plus proche du Soleil que celle de la Terre et que son mouvement de rotation est très différent.

Pour atteindre la première habitabilité terrestre, il fallait donc qu'un mécanisme naturel réduise considérablement cet énorme effet de serre. C'est ce qui s'est produit lorsque les océans transformèrent peu à peu le carbone de l'atmosphère, présent sous forme de gaz carbonique (CO_2), en carbone solide, présent sous forme de carbonates (CO_3^{2-}) ou de bicarbonates (HCO_3^-) de calcium, de magnésium, de fer ou d'autres métaux. Les détails de cette transformation, où les océans agissent comme un réacteur chimique fondamental, sont décrits dans le chapitre 2.

Une telle transformation ne s'est pas produite en un jour. Sa durée ne fait pas consensus parmi les chercheurs. Certains pensent que l'effet de serre a pu être suffisamment réduit pour permettre une première habitabilité peu de temps après l'apparition des premiers océans, c'est-à-dire il y a peut-être 4,3 milliards d'années. Dans cette hypothèse, l'émergence de la vie, ou une émergence de la vie, aurait donc pu apparaître il y a plus de 4 milliards d'années. Cette vie, si nous en sommes les descendants, aurait dû traverser l'évènement du bombardement météoritique intense et tardif qui s'est produit il y a environ 4 milliards d'années. À moins que la vie ait disparu lors de cet épisode, et qu'une seconde émergence de la vie, ou plusieurs, ait eu lieu après !

D'autres chercheurs pensent que la réduction de l'effet de serre primordial a pris plus de temps et que les conditions d'une première habitabilité ne furent acquises qu'il y a environ 4 milliards d'années ou légèrement plus tard. Les plus anciennes traces de vie fossilisées, ont un âge d'environ 3,5 milliards d'années. Des traces plus anciennes encore, mais dont l'origine biologique est moins sûre, sont datées d'environ 3,8 milliards d'années. L'âge de la première habitabilité de la Terre doit donc se situer entre 4,4 et 3,8 milliards d'années. C'est dans cette période qu'ont eu lieu une ou plusieurs émergences de vie, dont celle dont nous sommes issus.

Atteindre les conditions d'une première habitabilité est un destin précoce que la Terre a peut-être partagé avec Vénus et Mars. Mais force est de constater qu'après 4 milliards d'années, la Terre est toujours habitable alors que Vénus et Mars ne le sont plus, l'une étant dotée d'une atmosphère très dense qui produit un énorme effet de serre, l'autre ayant perdu l'essentiel de son atmosphère et, en conséquence, l'essentiel de son eau. Car, si l'on s'étonne souvent que la vie ait pu apparaître sur la Terre, on ne doit pas moins s'étonner que la vie ait pu s'y maintenir aussi longtemps.

De ce point de vue, le miracle terrestre est d'avoir préservé à long terme une certaine atmosphère, ni trop dense comme celle de Vénus, ni trop ténue comme celle de Mars, et, par-là, d'avoir préservé ses océans. En effet, ce sont les lois de la physico-chimie qui guident ici les évolutions planétaires. Dans les conditions actuelles de Vénus, les océans terrestres ne se seraient pas formés, ou se seraient évaporés sous l'effet de la température et l'eau aurait été perdue par dissociation photochimique et perte gravitaire de l'hydrogène dissocié. Dans les conditions actuelles de Mars, les océans terrestres se seraient également évaporés sous l'effet d'une très basse pression atmosphérique, et la vapeur d'eau aurait, de la même manière, subi une dissociation photochimique dans l'atmosphère, aboutissant finalement à une perte de tout ou partie de l'eau terrestre. La Terre aurait ainsi connu le funeste destin de Vénus ou celui de Mars. Mais il se trouve qu'une caractéristique acquise a évité à notre planète de connaître le sort de ses deux voisines telluriques.

Cette propriété est le champ magnétique qui est une conséquence de la structuration profonde de la sphère terrestre et des mouvements convectifs du noyau externe par rapport au manteau inférieur. Il a pour effet de dévier le flux des particules solaires ionisées, ou vent solaire, évitant ainsi l'impact direct de ces particules avec les composés de l'atmosphère, ce qui aboutirait à la destruction de ceux-ci. Depuis sa mise en place il y a environ 3,5 à 4 milliards d'années, et même si son intensité initiale était plus faible que celle d'aujourd'hui, le champ magnétique terrestre protège donc notre atmosphère.

Il est admis que la planète Mars, dont la pression atmosphérique au sol n'est actuellement que 0,006 atmosphère, soit moins de 1 % de la pression atmosphérique terrestre, a rapidement perdu son atmosphère sous l'effet principal du vent solaire. Ceci signifie que le champ magnétique de Mars a été moins protecteur que ne l'a été celui de la Terre. Pourquoi ? L'hypothèse est que le champ magnétique de Mars a quasiment disparu au début de son histoire, par suite d'un refroidissement rapide la planète. Celui-ci aurait entraîné une moindre fluidité des structures internes, notamment de celles du noyau planétaire, donc l'affaiblissement rapide du champ magnétique issu des mouvements relatifs de ces structures. La chronologie de ce phénomène n'est pas définitivement établie, certains chercheurs lui attribuent un âge d'environ 4,1 milliards d'années, mais d'autres un âge de 3,7 milliards d'années. L'atmosphère martienne n'a donc plus été protégée depuis au moins 3,7 milliards d'années, ce qui a largement laissé le temps au vent solaire de l'éroder.

De son côté, Vénus ne présente pas de champ magnétique mesurable aujourd'hui car l'échange convectif de chaleur entre son noyau et son manteau s'est vraisemblablement arrêté depuis longtemps. De ce fait, Vénus a probablement perdu précocement son aptitude à protéger son atmosphère par un champ magnétique puissant et a donc été soumis à l'érosion des composés les plus fragiles de son atmosphère, notamment de l'eau.

5. Un acquis tardif, la couche d'ozone stratosphérique

Les surfaces continentales de la Terre n'ont été colonisées par des êtres vivants que depuis environ 400 millions d'années, soit seulement le dixième du temps d'existence de la vie. Pour l'essentiel du temps, la vie fut exclusivement marine car l'adaptation de certaines espèces à la vie sur les surfaces continentales s'est longtemps heurtée à la nocivité du rayonnement solaire ultraviolet. Alors que les organismes marins en étaient protégés par une simple épaisseur d'eau de mer, et le sont toujours, les pionniers de la vie continentale n'eurent pendant longtemps aucune protection et la colonisation ne put avoir lieu.

Ce n'est que lorsque l'atmosphère terrestre fut suffisamment enrichie en dioxygène (O_2) qu'une couche d'ozone (O_3 ou trioxygène) stratosphérique stationnaire put se constituer au travers de réactions photochimiques. Cette couche protégea alors les surfaces continentales des rayonnements ultraviolets les plus nocifs et permit aux animaux de s'y adapter en commençant bien sûr par les aires littorales. Les animaux amenèrent avec eux un cortège de micro-organismes, ce qui ensemença leur nouveau milieu de vie au point d'aboutir à des écosystèmes complets, depuis les populations photosynthétiques, celles des plantes et des bactéries d'eau douce, jusqu'aux animaux et aux bactéries non photosynthétiques. Les adaptations des espèces permirent ensuite de créer d'autres écosystèmes dans les régions voisines, et ainsi de suite. Les surfaces continentales devinrent ainsi habitables, à l'exception des zones strictement dépourvues d'eau liquide, comme les très hautes altitudes, les calottes glaciaires, et certains déserts particulièrement arides.

6. La vie agit localement et globalement sur les milieux habitables

Aucun être vivant ne peut subsister sans mobiliser les ressources minérales, vivantes et énergétiques de son milieu de vie. En conséquence, tous les êtres vivants, sans exception, agissent sur leur milieu de vie local et peuvent en modifier les propriétés si celui-ci n'est pas régénéré suffisamment rapidement. Mais comme tous les écosystèmes sont interconnectés par des échanges d'énergie et de matière *via* les grands compartiments fluides de la planète, l'océan et l'atmosphère, les êtres vivants agissent aussi au niveau global. Leur action est d'autant plus importante que leurs populations sont denses et présentes sur la plus grande partie de la surface planétaire. En d'autres termes, plus la planète est habitable, plus les êtres vivants agissent sur elle. C'est ainsi que les contenus en oxygène de l'atmosphère et de l'océan ont lentement changé sous l'action des êtres vivants photosynthétiques, sur près de 2 milliards d'années. C'est ainsi que ces changements ont été ralentis, puis que les contenus ont été stabilisés sous l'action des organismes vivants qui respirent. Beaucoup d'êtres vivants, comme les plantes et les macro-algues, agissent même doublement, en produisant de l'oxygène *via* la photosynthèse, et en consommant de l'oxygène *via* la respiration. La teneur en oxygène de l'atmosphère a finalement atteint une valeur stationnaire de 21 % en volume il y a environ 500 millions d'années, dont elle ne s'est quasiment plus écartée, sauf peut-être au Carbonifère selon les études paléontologiques (vers 350 millions d'années). À cette période, la colonisation des surfaces continentales allait bon train et les conditions géologiques favorisaient la fossilisation de la matière organique et son corollaire, l'accumulation d'oxygène. Depuis plus de 500 millions d'années, l'océan est également bien oxygéné à l'exception de quelques régions profondes confinées, c'est-à-dire moins ventilées par les courants marins, où la consommation de l'oxygène l'emporte sur les apports. Cette oxygénation des océans a probablement été la cause d'une diversification des milieux marins peu profonds, comme en témoigne la diversification adaptative des faunes et de flores fossiles de l'Ediacarien (635 à 541 millions d'années) et du Cambrien (540 à 485 millions d'années). Il est même courant de parler de l'explosion cambrienne pour désigner l'abondance et la diversité des faunes fossiles de cette période par rapport à celle des périodes antérieures. Ces faunes sont notamment composées d'arthropodes, c'est-à-dire d'animaux dont les pattes sont faites de segments articulés, comme les actuels crustacés ou les araignées. L'une de leurs caractéristiques est aussi de disposer de squelettes externes, c'est-à-dire de carapaces, une innovation évolutive qui semble avoir émergé au Cambrien. On ne sait toutefois pas vraiment si ces faunes du Cambrien traduisent une réelle diversification des

espèces ou simplement une plus grande préservation des fossiles, précisément à cause de l'apparition évolutive des squelettes. Le terme d'explosion cambrienne doit donc être compris avec une certaine prudence.

Il existe bien d'autres exemples d'action des êtres vivants sur leur environnement local, voire sur l'environnement global. Certaines populations proliférantes, végétales ou animales, prennent parfois le dessus sur toutes les autres dans un milieu restreint comme un lac ou une lagune. Elles modifient en cela la diversité biologique et consomment les ressources disponibles jusqu'à leur épuisement. Le destin de ces populations est, le plus souvent, de disparaître lorsque le milieu est épuisé. Il est en effet rare de voir s'établir des équilibres stables avec une espèce trop dominante. Les êtres humains ont connu ce processus et ont épuisé les ressources de nombreux milieux locaux. Mais comme ils avaient la capacité d'émigrer ou d'aller chercher des ressources ailleurs, leur développement démographique se poursuivit. Le problème actuel des humains est de proliférer à l'échelle de la Terre entière, avec en plus une technologie qui amplifie considérablement l'efficacité de l'utilisation des ressources. Il n'y a pas à cette échelle, de possibilité d'émigration ni d'utilisation de ressources extraterrestres. Si l'on exclut un effondrement démographique dû aux maladies et aux guerres, le sort des humains tiendra donc à leur capacité de gérer les ressources avec une grande anticipation. L'impact et les perspectives de notre civilisation humaine est développé dans le chapitre 7.

7. Des évolutions adaptatives ont contribué à réguler l'habitabilité globale

Les espèces s'adaptent donc aux modifications environnementales globales créées par les populations d'êtres vivants et ces adaptations induisent elles-mêmes de nouvelles actions sur l'environnement global. Si ces actions prolongent et amplifient les précédents changements environnementaux, c'est-à-dire si cette rétroaction est positive, l'habitabilité est inévitablement menacée puisque, tôt ou tard, certaines conditions physiques, chimiques deviendront incompatibles avec la vie. Mais, fort heureusement, certaines réponses adaptatives sont des rétroactions négatives qui, au contraire, modèrent ou compensent les changements environnementaux antérieurs. En d'autres termes, elles régulent les conditions environnementales et préservent par-là l'habitabilité globale. L'émergence de la respiration, et ses optimisations furent, par exemple, des réponses adaptatives à la toxicité environnementale, celle de

l'oxygène (O_2), engendrée par la photosynthèse. À partir du Carbonifère, il y a environ 300 millions d'années, l'accumulation d'oxygène dans l'environnement global s'est arrêtée ce qui signifie que le flux moyen d'oxygène consommé par la respiration a été équivalent au flux moyen d'oxygène produit par la photosynthèse. Depuis cette période, le niveau d'oxygénation de la planète a été approximativement constant si l'on en juge par la teneur en oxygène de l'atmosphère et par les indices biologiques et géochimiques qui en témoignent, soit environ 21 % en volume. Les espèces photosynthétiques jouent essentiellement un rôle passif dans cette stabilisation. Par leur évolution génétique ou par la dynamique de leurs populations, elles s'adaptent au niveau de renouvellement des nutriments qu'elles peuvent mobiliser. Bref, elles font leur maximum avec la lumière solaire qu'elles reçoivent et avec les nutriments disponibles ! En revanche, l'expansion des espèces qui respirent, consécutive à leurs adaptations à tous les milieux potentiellement habitables, fut la cause du ralentissement de l'oxygénation puis de sa stabilisation. Dans cette situation, il est probable que les populations des êtres vivants photosynthétiques et de ceux qui respirent ont atteint leurs limites de développement possible. Les uns et les autres ont conquis le maximum de milieux habitables potentiels et leur activité est désormais limitée par les flux de ressources bioénergétiques qui leur sont nécessaires. D'un côté la production globale de matière organique par la photosynthèse est limitée par la lumière et par le flux global de nutriments renouvelés par la convection des océans, par le volcanisme et par l'érosion. D'un autre côté, sur une planète où l'oxygène s'est accumulé, la respiration n'est limitée que par l'abondance de la nourriture, qui dépend directement ou indirectement de la production de matière organique primaire par la photosynthèse et de la libération de matière organique sédimentaire par l'érosion.

Le niveau d'oxygénation stabilisé de l'atmosphère terrestre depuis 300 millions d'années s'est donc probablement mis en place dans un contexte évolutif où les espèces photosynthétiques et les espèces qui respirent avaient conquis le maximum de milieux de vie possibles.

On pourrait m'objecter ici que, avant 300 millions d'années la Terre a connu des périodes plus et moins habitables, et que la période actuelle n'est pas forcément la plus favorable d'un point de vue climatique, qu'elles que fussent les causes des variations du climat. Ceci est vrai sous l'angle de l'habitabilité objective, celle des conditions les plus fondamentales de la vie. En effet, l'extension des milieux objectivement habitables dépend étroitement du climat puisqu'il conditionne

notamment la présence ou l'absence d'eau liquide. Mais les conditions de l'habitabilité objective ne sont en général pas suffisantes pour que n'importe quelle espèce existante vienne s'établir dans un milieu. Un temps d'adaptation aux autres conditions, notamment celles de ressources, est nécessaire. Une fois habité, et nécessairement constitué en écosystème, le milieu devient alors réellement habitable. Son habitabilité est subjective car elle est liée à l'adaptation des groupes d'espèces qui l'occupent et qui, ensemble, constituent un écosystème.

Sous l'angle de l'habitabilité subjective, les variations climatiques ne font que moduler l'occupation des milieux. L'adaptation préalable qui structure bio-énergétiquement les écosystèmes s'est déjà produite Cette adaptation signifie que les principaux groupes d'espèces assurant le fonctionnement biologique d'un écosystème (espèces photosynthétiques et espèces qui respirent dont les herbivores, les prédateurs, les détritivores, et beaucoup de bactéries...) sont présents et capables de constituer un écosystème complet si l'eau liquide est les nutriments minéraux sont à leur portée. À partir de là, les populations d'espèces, ou les peuplements d'espèces, continuent d'évoluer mais le font dans le sens d'un repli ou d'un déploiement en fonction de la restriction ou de l'extension des conditions objectives d'habitabilité, notamment de la présence d'eau liquide. L'exemple le plus connu d'évolution postérieure à la structuration bioénergétique des écosystèmes est celui de la disparition de la plupart des dinosaures en raison d'un évènement aléatoire il y a 65 millions d'années, et leur remplacement par les mammifères et les oiseaux. Mais fondamentalement, les rôles bioénergétiques fonctionnels subsistent même si les acteurs changent.

On peut donc considérer qu'à partir de la fin de la colonisation des espaces continentaux par la vie, c'est-à-dire en gros au Carbonifère, l'adaptation bioénergétique des écosystèmes était déjà maximum. L'évolution ultérieure des espèces a répondu aux aléas naturels, dont ceux du climat, et à la compétition entre espèces, mais sans modifier fondamentalement la structuration bioénergétique des écosystèmes.

On pourrait aussi m'objecter que depuis 35 millions d'années, le climat terrestre présente des alternances entre des phases glaciaires, comme le dernier maximum glaciaire d'il y a environ 20 000 ans, et des phases interglaciaires comme celle que nous vivons depuis environ 12 000 ans (l'Holocène). Bien sûr, les phases glaciaires sont moins habitables, mais là aussi sous l'angle de l'habitabilité objective, c'est-à-dire de la contraction de milieux de vie où l'eau liquide est présente. Les espèces

photosynthétiques et les espèces qui respirent s'adaptent géographiquement à ces changements ce qui ne modifie pas nécessairement le rapport entre le flux d'oxygène produit et le flux d'oxygène consommé. En d'autres termes, les habitabilités subjectives des espèces photosynthétiques et des espèces qui respirent sont optimisées et probablement dans un rapport constant depuis le Carbonifère, même si l'extension de leurs milieux de vie a changé de nombreuses fois en raison des variations climatiques. Dans cette hypothèse, le niveau d'oxygénation de la planète est peut-être devenu indépendant des variations climatiques et est resté constant depuis 300 millions d'années.

8. Une régulation de l'habitabilité globale ?

L'oxygénation de l'océan et de l'atmosphère, les deux grands compartiments fluides et habitables de la Terre, a été stabilisée. Ceci a préservé globalement l'habitabilité globale puisqu'un excès d'oxygène aurait abouti à une toxicité insurmontable pour tous les êtres vivants. Mais peut-on dire pour autant que l'oxygène est aujourd'hui régulé ?

La régulation d'un système implique un ensemble d'actions et de rétroactions internes qui tendent à maintenir ce système dans un certain état en corrigeant les perturbations imposées par le monde externe. En biologie et en mathématiques, ces rétroactions sont plutôt désignées comme des boucles autoréférentes. C'est par exemple le cas pour les systèmes biochimiques de régulation de l'expression des gènes. En sciences des systèmes complexes, un ensemble de telles rétroactions au sein d'une structure dynamique, peut aussi aboutir à réguler cette structure, qui s'appelle alors un attracteur. Les êtres vivants, depuis leur état cellulaire ou embryonnaire, jusqu'à leur état adulte, sont des systèmes régulés, c'est-à-dire des attracteurs. Si une perturbation limitée et temporaire les atteint, comme un simple coup de froid, une infection, ou une crise métabolique mineure, leur capacité régulatrice leur permet de la corriger. Mais lorsque la perturbation est trop importante, l'attraction peut ne plus suffire et la régulation peut disparaître, ce qui signifie la mort de l'attracteur. Évidemment, la puissance de l'attracteur, c'est-à-dire l'état de santé d'un système régulé tel qu'un être vivant, dépend elle-même de l'âge, des déficiences génétiques, immunitaires ou autres, et des perturbations déjà en cours comme par exemple une hypothermie.

Le système Terre est-il devenu un attracteur ? Régule-t-il sa propre habitabilité ? Une réponse positive à cette question a été clairement donnée par l'hypothèse Gaïa ou la théorie Gaïa, défendue par James Lovelock et Lynn Margulis dans les années 70 (voir par exemple *Les âges de Gaïa,* Robert Laffont). La présentation de cette théorie et des controverses auxquelles elle a donné lieu constitue une partie du chapitre suivant, consacré aux régulations du système Terre. J'ai moi-même publié un ouvrage sur le sujet des attracteurs et de la régulation globale du système Terre (*les attracteurs de Gaia,* 2008).

CHAPITRE 6

Les régulations du système Terre

1. Qu'est-ce qu'une vraie régulation ?

Dans un système naturel, l'effet d'un phénomène peut être compensé par celui d'un autre, ou de plusieurs autres, mais ceci n'aboutit pas nécessairement à la régulation de l'état global du système, ni même à celle d'une de ses variables d'état comme la température du corps, la salinité de l'eau de mer, ou l'effet de serre atmosphérique. Il se peut qu'une telle compensation aboutisse simplement à une stabilité stationnaire de l'état en question, ce qui donne l'apparence temporaire d'une régulation mais qui n'en est pas une. Pour qu'il y ait réellement une régulation, il faut que l'action des phénomènes converge vers une certaine valeur à réguler, que j'appelle ici un point de régulation, celle-ci pouvant être objective si elle est imposée par des lois physiques, chimiques, ou biologiques fondamentales, ou subjective si elle est imposée par une nécessité ou une volonté extérieure au système. Le réglage d'un thermostat de chauffage domestique fixe un point de régulation subjectif car il est une volonté humaine indépendante du système de chauffage. En revanche, comme la suite de ce chapitre va le montrer, il existe des points de régulation objectifs que l'évolution du système Terre lui a permis d'atteindre et qui répondent à des nécessités physiques ou chimiques fondamentales, ou à des nécessités biologiques acquises au cours de l'évolution du vivant. Les points de régulation objectifs ne sont pas téléologiques, c'est-à-dire qu'ils ne répondent à aucune nécessité ou volonté externe, qu'elle soit naturelle ou divine. En cela, ils caractérisent un système autopoïétique. Ils s'établissent éventuellement lors de l'évolution spontanée d'un système complexe soumis aux lois fondamentales de la dynamique et de la structuration de la matière.

2. Parler d'autorégulation du système Terre est une trivialité

La Terre est un système complexe qui a évolué depuis 4,5 milliards d'années en transformant de l'énergie et par une structuration croissante de sa matière. Cette longue évolution lui a permis de mettre spontanément en place des régulations

vraies, qui sont des autorégulations au sens où les points de régulation ne répondent qu'à la structuration dynamique interne du système et aux lois combinatoires fondamentales de la matière. Mais, dans l'esprit de ce livre, parler d'autorégulation est trivial car il ne peut y avoir d'intention extérieure pour promouvoir de telles régulations, ni humaine car les humains font pleinement partie du Système, ni divine car l'existence de Dieu relève de la spiritualité de chacun mais ne peut être considérée comme une hypothèse scientifique.

3. La régulation de l'effet de serre, un mécanisme abiotique

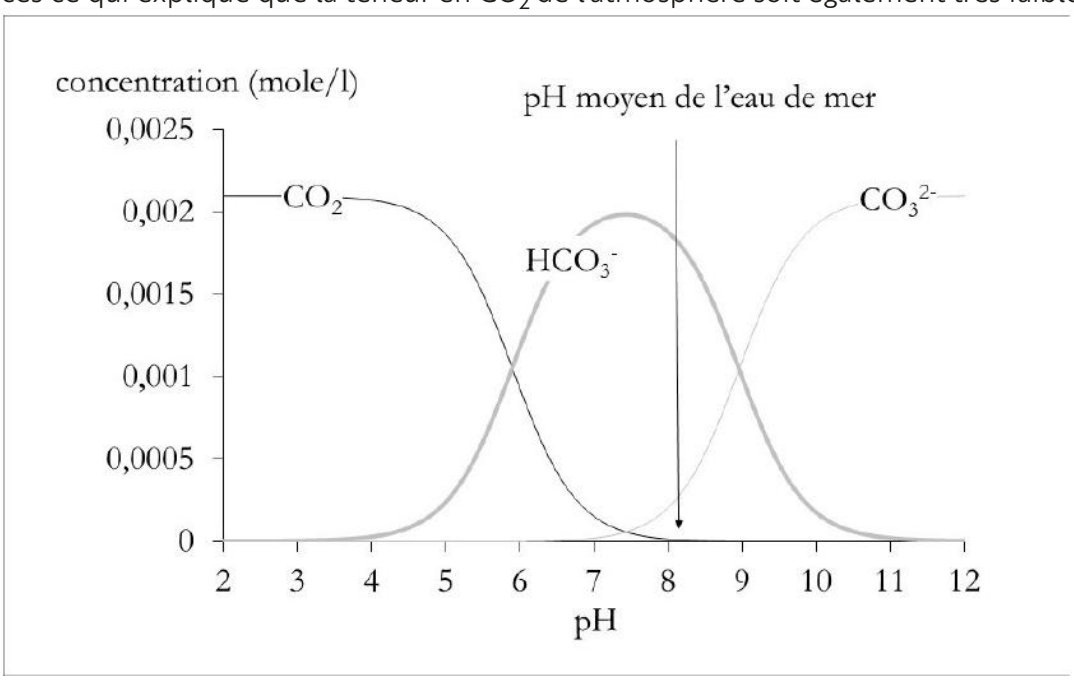
La première régulation, sans doute la plus fondamentale pour l'habitabilité terrestre, fut celle de l'effet de serre. Elle a été décrite dans le chapitre 2 en y soulignant le rôle central joué par les océans dès le début de l'histoire terrestre, il y a 4,4 milliards d'années. Il s'agit d'un mécanisme intrinsèquement abiotique, c'est-à-dire qui peut exister sans la vie, car il est fondé sur des mécanismes physiques et physico-chimiques d'échanges de matière entre l'atmosphère, l'océan et les sédiments. Ces mécanismes répondent d'une part à la nécessité physique d'aller vers un équilibre de pression de gaz entre l'atmosphère et l'océan, d'autre part à la nécessité d'aller vers un équilibre chimique au sein de l'eau de mer en utilisant la possibilité d'exporter ou d'importer de la matière au travers des contacts avec l'atmosphère et avec les sédiments.

Le point de régulation de l'effet de serre dépend du pH moyen de l'eau des océans. C'est en effet le pH qui détermine comment les différentes formes moléculaires du carbone inorganique dissous se répartissent entre le dioxyde de carbone (CO_2), l'ion bicarbonate (HCO_3^-) et l'ion carbonate (CO_3^{2-}). Au pH moyen actuel de l'océan (environ 8,2), c'est la forme bicarbonate qui domine (**Figure 6.1**). Pour des pH acides, inférieurs à 6, et pour des pH basiques, supérieurs à 9, ce sont les formes dioxyde de carbone et carbonate qui dominent respectivement. Il y a donc peu de CO_2 dissous dans l'océan actuel et, par voie de conséquence, il y en a très peu dans l'atmosphère puisque les pressions de gaz tendent à s'équilibrer entre l'océan (forme dissoute) et l'atmosphère (forme gazeuse). Cette faible teneur en CO_2 atmosphérique est toutefois suffisante pour entretenir un effet de serre minimum qui nous évite une glaciation globale. De plus elle reste faible ce qui nous évite un emballement de l'effet de serre et un climat brûlant inhabitable. Il en est ainsi tant que le pH de l'océan reste stable et ne s'éloigne pas trop de sa valeur actuelle. Si l'on excepte quelques périodes

marquées par des phénomènes géologiques de grande ampleur, volcaniques notamment, il semble que le pH de l'océan ait peu varié depuis près de 4 milliards d'années. Cette stabilité remarquable est due à celle d'autres caractéristiques chimiques de l'océan comme la salinité ou les teneurs en d'autres éléments et composés ioniques, c'est-à-dire chargés électriquement. Le pH, qui est une fonction logarithmique de la teneur en ions H^+, participe à la neutralité électrique de l'eau de mer, et dépend donc des autres populations d'ions dissous.

Bien évidemment, l'effet de serre peut varier autour de son point de régulation pendant des périodes transitoires soumises à des contraintes naturelles géologiques importantes. Ce fut le cas lorsque des phases d'activités volcaniques émirent de très grandes quantités de laves qui se solidifièrent en basaltes. L'altération météoritique de ceux-ci utilise le CO_2 de l'atmosphère. Elle peut donc induire un déficit d'effet de serre si le mécanisme régulateur de l'océan ne corrige pas assez vite la consommation de CO_2 par l'altération des basaltes. C'est ce qui s'est notamment passé lors de la fragmentation du supercontinent Rodinia, entre 750 et 630 millions d'années, et qui a abouti

Le carbone minéral en solution dans l'eau se distribue entre 3 formes principales, le CO_2 dissous, le bicarbonate dissous (HCO_3^-) et le carbonate dissous (CO_3^{2-}). La proportion entre ces 3 formes est notamment dépendante du pH de l'eau comme le montre ce diagramme (un tel diagramme est appelé diagramme de Bjerrum, du nom de son concepteur, un chimiste danois). Le pH de l'eau de mer est d'environ 8,2 si bien que le carbone minéral s'y trouve principalement sous la forme bicarbonate, et minoritairement sous la forme carbonate. Le CO_2 dissous ne s'y trouve qu'à l'état de traces ce qui explique que la teneur en CO_2 de l'atmosphère soit également très faible.



à une glaciation majeure quasi-complète, de type Terre boule de neige. Un tel refroidissement s'auto-amplifie car il réduit progressivement, par l'extension de la glace qui recouvre les océans (glace de mer, banquise), les surfaces d'échanges entre l'océan et l'atmosphère, affaiblissant ainsi le mécanisme régulateur. Par ailleurs, l'extension des surfaces englacées augmente la réflexion de la lumière solaire vers l'espace (albédo) ce qui amplifie aussi le refroidissement. Il est donc probable que la sortie d'une telle glaciation ne s'appuie pas seulement sur le mécanisme régulateur des océans mais relève également de modifications dans le type d'activité volcanique globale de la Terre. Lorsque la phase d'émission de laves se ralentit, la consommation de CO_2 diminue alors que les émissions volcaniques continentales de CO_2 se poursuivent, ce qui a pour effet d'enrichir de nouveau l'atmosphère en CO_2, et d'augmenter ainsi l'effet de serre. Ce réchauffement, comme le refroidissement qui l'a précédé, s'autoamplifie puisque l'extension de la glace de mer diminue et que le mécanisme régulateur devient plus efficient. Lorsque l'océan est suffisamment libéré de la glace de mer, le mécanisme régulateur retrouve sa puissance et contrôle de nouveau l'effet de serre.

La régulation de l'effet de serre par les échanges de matière entre l'atmosphère, les océans et les sédiments est un mécanisme intrinsèquement abiotique qui a commencé à fonctionner avant l'émergence de la vie. La vie y a néanmoins pris une place importante en jouant un rôle médiateur. Ce sont d'abord des organismes bactériens coloniaux qui, très tôt, il y a plus de 3 milliards d'années, ont commencé à former des concrétions calcaires (stromatolithes) par lesquelles des ions carbonates dissous passent à l'état solide. Les descendants actuels de ces bactéries continuent à construire des stromatolithes, comme dans certaines baies littorales des Bahamas, d'Australie ou du Moyen Orient. Beaucoup plus tard, juste avant le début de l'ère Primaire (avant le début du Cambrien, il y a environ 540 millions d'années), l'évolution adaptative des êtres vivants marins a fait émerger les coraux, les coquilles et les squelettes, augmentant alors la médiation biologique du transfert de l'ion carbonate dissous vers sa forme solide. Depuis cette époque, les sédiments marins carbonatés, ceux qui forment souvent les falaises de nos montagnes ou de nos littoraux, ont été essentiellement constitués par des débris de coraux, des coquilles et des squelettes calcaires. Ceci signifie que la vie marine est pleinement impliquée dans le mécanisme régulateur de l'effet de serre et en subit les répercussions. Quand l'effet de serre est situé sous le point de régulation, c'est-à-dire dans des périodes froides, le mécanisme régulateur tend à favoriser le transfert de l'ion carbonate vers la forme

solide, donc à favoriser l'habitabilité subjective des êtres vivants qui construisent des coquilles et des squelettes. Inversement, cette habitabilité diminue lorsque l'effet de serre est situé au-dessus du point de régulation, c'est-à-dire dans des périodes chaudes. C'est en fait ce que disent d'une autre manière les océanographes lorsqu'ils constatent qu'aujourd'hui, avec l'augmentation de l'effet de serre liée aux émissions anthropiques de CO_2, l'océan s'acidifie légèrement, ce qui défavorise la bioconstruction des coquilles et des squelettes.

La régulation de l'effet de serre dont je viens de parler s'exerce à une échelle de temps qui équivaut à celle de la circulation océanique globale, de l'ordre du millier d'années. Les échanges de matière impliqués ne peuvent en effet se réaliser que lorsque des propriétés de l'eau de mer acquises au contact de l'atmosphère, c'est-à-dire en surface, sont transférées au contact des sédiments profonds, et inversement. Or, le temps moyen pour qu'une molécule d'eau de l'océan quitte la surface au travers de la formation d'eau profonde dans certaines régions, atteigne les sédiments, puis revienne à la surface sous l'effet de la convection océanique générale est de l'ordre du millier d'années.

4. La régulation des nutriments océaniques, une dynamique de populations

Si la régulation de l'effet de serre est fondamentale abiotique, il existe des régulations fondamentalement biologiques. Celle du rapport des nutriments majeur dans l'océan, le nitrate et le phosphate dissous, est l'une d'entre elles.

La fabrication de la matière vivante du plancton photosynthétique exige de l'énergie, celle du rayonnement solaire. Mais elle exige aussi de la matière sous forme de composés disponibles dans l'environnement, c'est-à-dire de nutriments. La demande photosynthétique du plancton est d'environ 106 atomes de carbone pour 16 atomes d'azote et 1 atome de phosphore, correspondant à une formule moyenne $C_{106}N_{16}P_1$. Il faudrait y ajouter la contribution de l'hydrogène et de quelques autres éléments en traces, mais nécessaires à la vie. Le carbone et l'hydrogène ne sont jamais des nutriments limitants car ils sont largement présents dans l'océan. En revanche, si le rapport N/P est inférieur à 16, l'azote limite la photosynthèse. S'il est supérieur à 16, c'est le phosphore qui limite la photosynthèse.

Ces rapports entre les proportions élémentaires du carbone, de l'azote et du phosphore ont été découverts et étudiés par Alfred C. Redfield dans les années 1930. Redfield a remarqué la similitude du rapport N/P dans la biomasse du phytoplancton marin et dans l'eau de mer, où l'azote se trouve sous forme de nitrate dissout (NO_3^-) et le phosphore sous forme de phosphate dissout (PO_4^{3-}). Une telle similitude n'est pas fortuite car le rapport des concentrations de nitrate et de phosphate dissous dans l'océan, que j'appelle ci-dessous le rapport $(N/P)_{dissout,}$ est régulé avec comme point de régulation le rapport N/P de la biomasse du phytoplancton, que j'appelle ici $(N/P)_{bio}$. Voyons comment fonctionne ce mécanisme (**Figure 6.2**) !

Si le rapport $(N/P)_{dissout}$ est supérieur à 16, c'est le phosphate qui est limitant. Dans ce cas, la photosynthèse s'ajuste sur le flux de phosphate qui alimente l'océan, dont les principaux contributeurs sont les apports fluviatiles issus de l'érosion continentale. La biomasse produite est en partie exportée vers l'océan profond où elle est dégradée par des bactéries, les unes aérobies, c'est-à-dire actives en présence d'oxygène, les autres anaérobies, c'est-à-dire actives dans les milieux appauvris en oxygène, voire sans oxygène. Or il se trouve que des bactéries marines anaérobies transforment le nitrate dissous (NO_3^-) en nitrite (NO_2^-) puis en monoxyde d'azote gazeux (N_2O), ou même parfois en azote moléculaire (N_2) également gazeux. Au bout du compte, les produits gazeux sont véhiculés par les courants marins qui, à un moment ou à un autre, regagnent la surface. L'équilibrage des pressions de gaz entre l'eau de mer et l'atmosphère conduit alors à un dégazage de l'océan et à une perte globale d'azote dissous. Le bilan de cette chaîne de phénomènes est que le rapport $(N/P)_{dissout}$ diminue si le flux de phosphate à l'océan ne varie pas. On voit donc qu'un rapport $(N/P)_{dissout}$ supérieur à 16 engendre des phénomènes qui tendent à ramener ce rapport vers la valeur 16.

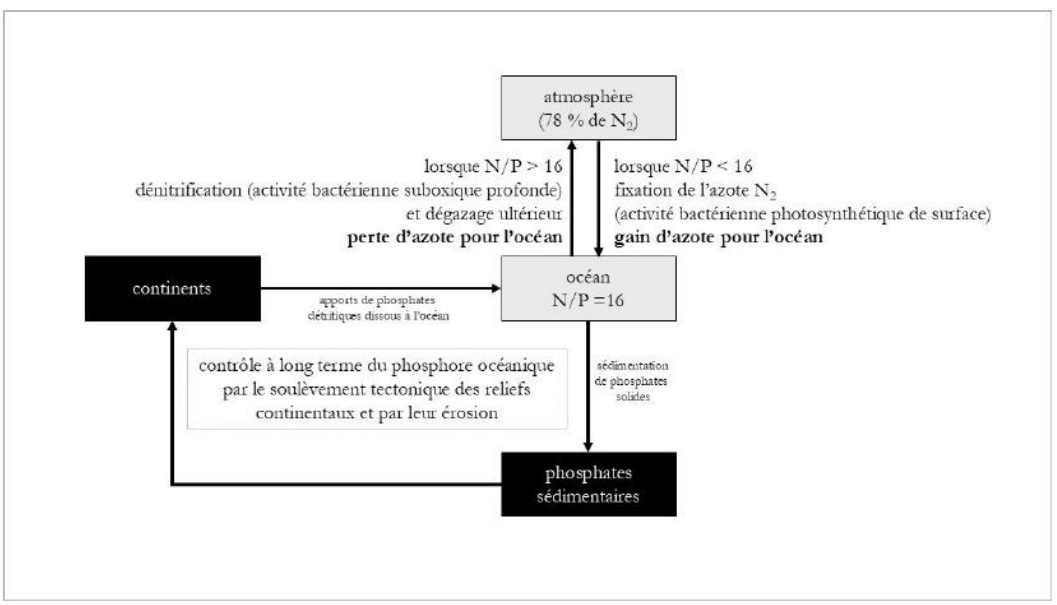
Si le rapport $(N/P)_{dissout}$ est inférieur à 16, c'est le nitrate qui est limitant pour la photosynthèse. Dans ce cas, certaines populations photosynthétiques ont la capacité d'utiliser, comme source nutritive, l'azote moléculaire (N_2) dissout dans l'eau de mer. Comme les pressions d'azote N_2 de l'eau de mer et de l'atmosphère tendent à s'équilibrer, cette utilisation biologique d'azote est comblée par une dissolution d'azote atmosphérique. Ceci signifie que la production photosynthétique de ces

populations aboutit à une réinjection d'azote dans l'océan, dont une partie au moins se retrouvera sous la forme de nitrate. Ceci tend à augmenter le rapport $(N/P)_{dissout}$ et à le ramener vers la valeur de 16.

Ces deux chaînes de processus constituent donc un puissant mécanisme régulateur, fondé sur une dynamique de populations entre deux groupes distincts du phytoplancton aérobie, l'un utilisant le nitrate, l'autre utilisant l'azote moléculaire, et un groupe de bactéries marines anaérobies qui réduit les nitrates. Ce mécanisme agit à une échelle de temps qui est celle de la convection océanique générale, c'est-à-dire de l'ordre du millier d'années.

Aux échelles de temps géologiques il est probable que le point de régulation, c'est-à-dire la demande biologique du phytoplancton en différents éléments chimiques, a varié sous l'effet des modifications environnementales et de l'évolution adaptative subséquente. Si cette demande est aujourd'hui adaptée à l'actuel rapport de Redfield (N/P=16), il est possible qu'elle ait été différente dans le passé, notamment en raison d'une moindre oxygénation des environnements. Les populations de phytoplancton étaient alors anaérobies et leur demande biologique était probablement différente. Dans le contexte d'une Terre globalement bien oxygénée telle que nous la connaissons depuis environ 500 millions d'années, d'éventuelles modulations du point de régulation ne sont pas exclues en raison des variations géographiques liées à la tectonique des plaques. Certains océans se sont trouvés plus confinés, donc moins ventilés et moins oxygénés à certaines périodes. Ils ont peut-être favorisé par-là l'activité bactérienne anaérobie de réduction des nitrates et la perte d'azote de l'océan. Mais, même si le point de régulation a pu subir quelques fluctuations depuis 500 millions d'années, le mécanisme régulateur s'est toujours exercé sur une échelle de temps plus courte, de l'ordre du millier d'années.

Certaines populations photosynthétiques marines aérobies ont la capacité d'utiliser l'azote moléculaire dissous (N_2), donc de faire indirectement appel à l'azote gazeux atmosphérique si l'océan est déficitaire en azote sous la forme nitrate (NO_3^-) par rapport au phosphore. D'un autre côté, certaines populations bactériennes marines anaérobies convertissent les nitrates issus des détritus organiques qui leur parviennent de la surface en composés gazeux susceptibles de retourner à l'atmosphère, et d'appauvrir ainsi l'océan en azote. L'antagonisme entre ces deux activités biologiques marines est le point clé d'un mécanisme global qui régule le rapport N/P à une échelle de temps de l'ordre du millier d'années.



5. La régulation de l'oxygène, la plus belle expression de l'autopoïèse terrestre

L'oxygénation de notre planète a lentement augmenté depuis plus de 2 milliards d'années, et jusqu'il y a environ 300 millions d'années. Depuis cette période, les indices paléontologiques et géochimiques mesurés semblent indiquer que le niveau d'oxygénation global a été stable, son indice mesurable étant une teneur atmosphérique d'environ 21 % en volume.

Si le suivi de la teneur actuelle de l'atmosphère en oxygène peut s'effectuer de manière directe depuis environ 2 siècles, il faut faire appel à des mesures indirectes pour les périodes plus anciennes du passé. L'air piégé dans les bulles de glaces des calottes glaciaires (Antarctique ou Groenland) permet d'atteindre le million d'années. Au-delà, ce sont des paramètres géochimiques ou biologiques fossiles qui prennent le relais. Sur une base théorique, ou statistiquement calibrée, ceux-ci permettent une correspondance avec des teneurs en oxygène de l'atmosphère, donc une paléo-reconstitution des évolutions de la teneur en oxygène de l'atmosphère ancienne.

Rappelons ici que l'oxygène moléculaire (O_2) est produit par la photosynthèse, qu'il est hautement réactif, et qu'il se combine avec la plupart des autres éléments pour former des oxydes. Il ne peut donc s'accumuler dans l'environnement que lorsque ses proies chimiques sont épuisées ou hors de sa portée. C'est ce qui s'est passé dans l'histoire de la Terre. Les proies chimiques principales, comme le méthane (CH_4), le fer élémentaire (Fe), les sulfures de fer (FeS, ou FeS_2), ou l'ion ferreux en solution (Fe^{2+}), ont été consommées par l'oxygène jusqu'à leur épuisement pour former des oxydes stables (CO_2, Fe_2O_3, SO_4^{2-}), ce qui a pendant longtemps empêché l'oxygénation des milieux de vie terrestres. Au-delà de ce réservoir de proies chimiques, qui sont les plus facilement oxydables, l'oxygène peut s'attaquer à la matière organique produite par la photosynthèse pour la retransformer en dioxyde de carbone (CO_2) et en eau (H_2O), soit l'inverse de ce que fait la photosynthèse.

Les espèces se sont adaptées d'un point de vue énergétique en utilisant soit la photosynthèse, dont l'énergie primaire est le rayonnement solaire, soit la respiration, c'est-à-dire une oxydation lente qui restitue l'énergie initiale utilisée par la photosynthèse, mais sous une autre forme. Celle-ci est chimique car elle tient à l'existence simultanée de deux composés susceptibles de réagir ensemble dans un

environnement donné, en l'occurrence l'oxygène et la matière organique. La plupart des espèces photosynthétiques eucaryotes, celles dont les cellules sont constituées d'organites différenciées (noyau, chloroplastes, mitochondries), ont tiré profit des deux sources énergétiques, le rayonnement solaire et l'énergie chimique accumulée. Elles photo-synthétisent et elles respirent.

À l'échelle d'un écosystème, une petite part du flux de matière organique produit par la photosynthèse échappe toujours à la respiration au travers de l'enfouissement dans les sédiments marins ou lacustres. C'est ainsi que, peu à peu, très lentement, au fil des temps géologiques, la matière organique sédimentaire s'est accumulée (**Figure 6.3**). On la trouve aujourd'hui dans les sédiments du fond des océans ou dans ceux que les mouvements tectoniques ont hissés au sommet des montagnes. Elle représente une masse bien plus importante que la biomasse vivante. Et comme la proie a su se cacher, son prédateur, s'est à dire l'oxygène moléculaire non mobilisé par les réactions d'oxydation, est toujours affamé et rode à l'affût. L'accumulation d'oxygène dans nos milieux de vie et l'accumulation de matière organique dans les sédiments de la Terre ont donc été, et sont toujours, des phénomènes liés et indissociables. Lorsque nous brûlons du pétrole, du gaz ou du charbon pour animer nos machines technologiques, nous ne faisons rien d'autre qu'utiliser un stock d'énergie fossile, celle que les actions conjointes de la photosynthèse et de la sédimentation ont patiemment accumulé sous forme chimique à partir du rayonnement solaire.

Si l'accumulation d'oxygène dans les milieux de vie terrestres n'avait pas été limitée, la vie n'aurait pu se poursuivre. En effet, la réactivité de l'oxygène en fait un prédateur chimique pour les molécules biologiques, donc un élément toxique pour les êtres vivants. Malgré leur aptitude évolutive, les espèces ne pourraient pas s'adapter à des teneurs en oxygène trop importantes. Pour les êtres vivants pluricellulaires actuels, le maximum est de l'ordre de 40 % en volume dans l'atmosphère car, au-delà de cette valeur, les répercussions au niveau de la teneur en oxygène du sang ne peuvent plus être physiologiquement régulées et la toxicité de l'oxygène devient létale. Des teneurs importantes 34 % en volume, ont peut-être été atteintes il y a environ 350 millions d'années, au début du Carbonifère, lorsque la végétation eut finalisé la colonisation des milieux continentaux et que les conditions paléogéographiques

De la matière organique fossile est présente dans de nombreuses roches sédimentaires, comme ici dans les strates sombres de cette falaise de la corniche basque. Elle est celle qui, à partir de la photosynthèse ancienne et des écosystèmes qu'elle soutenait, a pu être préservée en échappant à l'oxydation par l'oxygène. De ce fait, une partie de l'oxygène produit par la photosynthèse au même moment n'a pas été utilisée et s'est accumulée dans les milieux de vie, l'eau et l'air. Ce cliché montre aussi comment la strate dégagée du premier plan, qui marque un moment ancien de l'histoire sédimentaire, est suivi par de nombreux autres épisodes anciens dont les caractéristiques sédimentaires sont différentes, ce qui permet d'étudier les conditions paléo-environnementales du passé. Il montre enfin que la tectonique des plaques bouscule l'organisation spatiale des enregistrements sédimentaires puisque l'océan actuel et les sédiments modernes sont dans un plan très incliné par rapport au plan de sédimentation des épisodes anciens (ici proches de la limite Crétacé-Tertiaire, environ 65 millions d'années).

© P. Bertrand

furent très favorables à l'enfouissement de matière organique sédimentaire, dont une partie sous forme de tourbe (précurseur du charbon d'où le nom de la période Carbonifère). Mais de telles teneurs ne sont pas maintenues et sont revenues ensuite se stabiliser autour de la valeur de 21 % en volume.

Cette valeur de 21 % est-elle liée à un point de régulation pour l'oxygène, et si oui lequel ? Il serait très étonnant que l'oxygénation ait été stabilisée pendant près de 300 millions d'années, par une compensation fortuite de la production d'oxygène par sa consommation, c'est-à-dire de la photosynthèse par la respiration. Il serait également très étonnant que le corollaire de cette compensation, c'est-à-dire l'annulation du flux d'accumulation sédimentaire de matière organique, soit également fortuit.

Une hypothèse intuitive est que le niveau d'oxygénation terrestre atteint depuis le Carbonifère rend désormais impossible toute nouvelle accumulation de matière organique sédimentaire, donc toute nouvelle accumulation d'oxygène dans les milieux de vie. Mais, comme nous allons le voir, la régulation du stock d'oxygène révèle peut-être une réalité plus complexe, intrinsèque de l'autopoïèse de notre planète.

La stabilisation du stock d'oxygène et du stock de matière organique sédimentaire signifie que, globalement, l'activité de photosynthèse et les activités de respirations se compensent. C'est évidemment une situation moyenne, intégrée sur de très nombreux environnements géographiques différents, et sur une échelle de temps de plusieurs siècles ou milliers d'années. S'il s'était agi d'une situation uniforme et constante, la Terre n'aurait pas pu former les grands gisements d'hydrocarbures ou de charbons connus dans des sédiments de la fin de l'ère Secondaire (Crétacé) ou de l'ère Tertiaire. Cela veut simplement dire que, depuis 300 millions d'années, la destruction globale de matière organique équivaut à la création globale de nouvelle matière organique. L'oxygène produit par la photosynthèse est intégralement consommé par l'oxydation de la biomasse récente, celle des êtres vivants, ou par l'oxydation de la biomasse ancienne, celle que l'érosion met au contact de l'atmosphère. Mais ceci n'explique pas pourquoi la teneur en oxygène de l'atmosphère, c'est-dire le point de régulation, se situe vers 21 % en volume alors que cette teneur a peut-être atteint temporairement des valeurs plus fortes au début du Carbonifère, de l'ordre de 34 % en volume d'après certains chercheurs. L'évolution adaptative des espèces a très certainement joué là un rôle majeur, d'abord en

optimisant l'aptitude des êtres vivants à utiliser l'oxygène pour leurs besoins bioénergétiques, c'est-à-dire pour respirer, ensuite en adaptant les espèces ainsi dotées à tous les habitats possibles.

Le phénomène chimique d'oxydation est intrinsèquement abiotique. Il peut se produire sans la vie, lentement comme la corrosion oxydative de métaux, ou rapidement comme la combustion de bois sec. Mais, certaines bactéries primitives, qui vivaient dans des milieux anoxiques ou peu oxygénés, ont très vite acquis la possibilité d'utiliser l'oxygène pour oxyder lentement les ressources nutritives à leur disposition (corps ou cadavres d'autres bactéries), et en tirer le double profit d'un apport de nutriments et d'un apport d'énergie. La descendance de ces bactéries s'est beaucoup diversifiée par la suite avec l'oxygénation des milieux de vie, et une branche descendante entre même dans la constitution des cellules eucaryotes, celles des animaux, des plantes et des champignons. Ce sont les mitochondries qui ont, au sein de nos cellules, la capacité d'utiliser l'oxygène et qui nous transmettent donc, par symbiose, l'aptitude bioénergétique de la respiration. Charge à nous autres, les êtres vivants pluricellulaires, de capter l'oxygène et de le distribuer à l'ensemble de nos cellules ! C'est le sens de certaines grandes évolutions adaptatives qui nous ont dotés de fonctions comme le développement des systèmes vasculaires (veines et artères), foliaires (stomates), pulmonaires (poumons), branchiaux (branchies), cardiaques (cœur), et sanguins (globules rouges).

Une partie fondamentale de l'évolution adaptative des espèces a donc consisté en une extension de la diversité des fonctions permettant de respirer l'oxygène, depuis le rôle ancestral des premières bactéries aérobies jusqu'aux rôles des multiples cellules spécialisées qui, chez les organismes pluricellulaires, assurent la captation de l'oxygène et sa redistribution vers toutes les cellules musculaires et nerveuses du corps. Toutes ces émergences adaptatives sont très anciennes. L'aptitude bactérienne à la respiration de l'oxygène est probablement apparue il y a plus de 3 milliards d'années. La cellule eucaryote symbiotique, c'est-à-dire une cellule comportant en son sein des organites spécialisée comme un noyau, des chloroplastes ou des mitochondries, est probablement apparue il y a plus de 2 milliards d'années. La pluricellularité, c'est-à-dire l'aptitude à former des colonies cellulaires eucaryotes fonctionnelles formant un tout et capables de se reproduire en tant que tout, est apparue il y a plus d'un ou deux milliards d'années. Enfin les divers raffinements fonctionnels liés à la respiration de l'oxygène sont, pour la plupart, apparus il y a plus de 540 millions d'années (avant le Cambrien). Ces émergences adaptatives liées à

l'utilisation bioénergétique de l'oxygène, c'est-à-dire à ses avantages, ont été accompagnées par d'autres, liées à la protection contre les effets délétères de l'oxygène. La première respiration bactérienne de l'oxygène dériva déjà d'une émergence sélectionnée pour son caractère protecteur, consistant à donner des proies chimiques à l'oxygène afin de le détourner des précieuses molécules organiques de la machinerie cellulaire. Parallèlement, l'évolution des espèces bactériennes fit émerger des mécanismes moléculaires de protection. Par la suite, l'évolution des espèces pluricellulaires fit émerger des structures corporelles qui optimisèrent la protection par confinement des zones internes. En effet, dans le développement embryonnaire et corporel, sous l'influence de mécanismes de sélection épigénétiques, certaines cellules, comme celles de l'épiderme, acquièrent une plus grande résistance à l'oxydation, et assurent ainsi une protection périphérique de l'ensemble du corps. Ces innovations protectrices, comme les innovations bioénergétiques de la respiration, sont apparues bien avant le Cambrien.

Toutes ces émergences sont donc précambriennes. Elles ont contribué à optimiser l'aptitude de l'ensemble des êtres vivants à respirer l'oxygène, ce qui a conduit à ralentir, voire peut-être à stopper l'oxygénation de la planète. Mais elles n'expliquent toujours pas le point de régulation à 21 % en volume d'oxygène dans l'atmosphère, atteint au Carbonifère, puisqu'elles sont bien plus anciennes que 300 millions d'années.

La régulation de l'oxygène est donc un résultat observé mais pas encore expliqué. Dans les pages qui suivent, je propose une hypothèse fondée sur la nature systémique et adaptative de la Terre, c'est-à-dire sur son autopoïèse. Cette hypothèse est illustrée par un modèle numérique simple, permettant de simuler l'évolution du système, par un calcul algorithmique pas à pas (**Figures 6.4 à 6.8**).

Du point de vue évolutif, les êtres vivants tendent à coloniser tous les milieux potentiellement habitables, c'est-à-dire ceux où règnent les conditions nécessaires de l'habitabilité objective (température, nutriments). Ils le font au travers de l'évolution des espèces qui sélectionne des aptitudes complémentaires nécessaires pour habiter certains milieux de vie. C'est ainsi que les milieux deviennent réellement et subjectivement habitables, lorsque des espèces s'y sont adaptées en y structurant des écosystèmes, et en sont devenues les habitants. Les conditions de l'habitabilité subjective, ou habitabilité réelle, sont donc plus nombreuses que celles de l'habitabilité objective, ou potentielle, celles qui régnaient quelque part il y a environ 4 milliards d'années et qui permirent l'émergence de la vie terrestre.

Le principe de l'extension adaptative des espèces, et par-là des milieux habitables, étant posé (**Figure 6.4**), nous allons progressivement nous rapprocher d'une situation un peu plus réaliste, même si nous resterons très loin de la complexité naturelle. En premier lieu, il convient d'introduire un niveau minimum de biodiversité, en l'occurrence celui de la dualité ancestrale entre les espèces photosynthétiques et les espèces qui respirent, c'est-à-dire qui en consomment d'autres. Il en a déjà été beaucoup question dans ce livre. En second lieu, il est nécessaire d'introduire le paramètre environnemental qui nous intéresse ici, en l'occurrence le stock d'oxygène (O_2).

Les espèces photosynthétiques étendent d'abord leur effectif en colonisant le plus de milieux possibles (**Figure 6.5**). Puis les espèces qui respirent en font de même en utilisant l'effectif des espèces photosynthétiques comme ressource nutritive, cet effectif limitant donc leur développement. De ce fait, l'effectif des espèces photosynthétiques est ralenti, passe par un maximum, puis décroît. Finalement, un équilibre stationnaire global s'établit entre les effectifs des deux groupes d'espèces et un certain niveau minimum des ressources primaires nutritives. La biomasse vivante (assimilée ici à l'effectif de la population) des deux groupes d'espèces correspond à la matière organique produite par la photosynthèse mais qui n'a pas été consommée par la respiration. Et comme cette matière organique n'a pas été consommée, une certaine quantité d'oxygène, également produite par la photosynthèse, subsiste dans l'environnement. Ce stock d'oxygène environnemental s'accroît pendant la phase de développement des deux groupes d'espèces, puis se stabilise.

Une telle stabilisation est toutefois encore loin d'une situation réaliste puisque, dans la réalité, le stock d'oxygène de la Terre correspond essentiellement à la matière organique sédimentaire accumulée pendant des centaines de millions d'années, et très peu à la biomasse vivante. Il nous faut donc introduire maintenant le phénomène de sédimentation de la matière organique (**Figure 6.6**).

La vie continentale et la vie marine produisent aujourd'hui des débris, des cadavres, ou des pelotes fécales. Le destin de tous ces déchets organiques est un recyclage presque total, soit sur le lieu de leur production (océan superficiel ou surface continentale), soit lors de leur transport dans les réseaux fluviatiles, soit en coulant dans la masse d'eau océanique, soit à la surface des sédiments marins. Dans tous les cas, ils sont consommés par les espèces qui s'en nourrissent, c'est-à-dire les espèces qui respirent. Mais une petite part échappe à ce destin s'ils sont enfouis rapidement par les sédiments qui les recouvrent, et ainsi mis à l'abri de l'oxygène,

donc de la respiration aérobie. Pendant la période de l'Archéen (entre –4 et –2,5 milliards d'années), l'oxygène environnemental ne s'était pas encore accumulé et la préservation sédimentaire de la matière organique, alors exclusivement marine, n'en était que plus facile.

Il existe des respirations bactériennes anaérobies dans les sédiments (réduction des sulfates, des nitrates ou de certains oxydes ou hydroxydes métalliques) mais, à l'exception de la fermentation qui produit du méthane à partir de la seule matière organique, toutes ces activités anaérobies sont dépendantes de l'oxygène. C'est lui qui régénère les oxydants faibles comme les sulfates ou les nitrates à partir des composés réduits du soufre ou de l'azote, et par conséquent, c'est sa disponibilité en surface des sédiments qui détermine le niveau d'activité des respirations anaérobies.

La part préservée de la matière organique a été produite par la photosynthèse, ou elle en dérive *via* la production de la biomasse des espèces qui respirent. Une quantité équivalente d'oxygène a donc été produite mais n'a pas été consommée immédiatement par la respiration. Si d'autres éléments et composés oxydables ne sont pas, ou plus présents (fer, méthane par exemple), cette quantité d'oxygène s'accumule donc avec le temps, parallèlement à la matière organique sédimentaire. Après des centaines de millions d'années, le stock d'oxygène environnemental correspond donc principalement au stock de la matière organique sédimentaire, et relativement très peu à la biomasse vivante.

Si l'accumulation sédimentaire de matière organique ne subissait aucun recyclage, elle intégrerait la quasi-totalité des nutriments initialement disponibles, et la Terre deviendrait peu à peu stérile, ou pour le moins très peu féconde (**Figure 6.4**). Mais il existe un mécanisme naturel de recyclage qui s'exerce sous les influences conjointes de la tectonique des plaques et du climat, c'est l'érosion. D'une part la tectonique des plaques crée des reliefs émergés, notamment les continents. D'autre part, le climat s'évertue à éroder ces reliefs en créant les paysages que nous connaissons (vallées, gorges, pics et massifs, bassins fluviatiles, deltas, estuaires…). L'érosion remet de la matière organique sédimentaire au contact de l'atmosphère et ce flux apporte des ressources nutritives recyclées. Pour les espèces qui respirent, c'est un flux plus ou moins utilisable selon la transformation géologique que la matière organique a subie (« pain frais » ou « pain dur » ! comme dit l'un de mes collègues et ami). Pour les espèces photosynthétiques, les produits de l'oxydation abiotique ou de la respiration de cette matière organique recyclée sont un apport au stock des nutriments primaires. L'érosion, permise par la création de reliefs et par le climat, est donc un

mécanisme compensateur de la sédimentation sans lequel la vie terrestre se serait arrêtée, ou aurait été réduite au minimum depuis très longtemps. La vie n'aurait pu connaître les développements dont les plantes et les animaux sont issus.

Lorsque l'érosion s'exerce, le stock de nutriments primaires ne s'annule jamais (**Figure 6.7**). De ce fait, ce stock et les biomasses vivantes finissent par se stabiliser dans un équilibre stationnaire. Cet équilibre se traduit aussi par une égalité entre le flux de matière organique sédimentée et le flux de matière organique érodée, donc à une stabilisation des stocks d'oxygène et de matière organique sédimentaire. L'oxygénation terrestre s'est stabilisée avec une teneur en oxygène de 21 % en volume dans l'atmosphère, ce qui est l'indice observable de cette stabilisation. Dans l'interprétation modélisée que nous examinons ici, la valeur de stabilisation du stock d'oxygène n'est que peu sensible aux paramètres géologiques et biologiques retenus, c'est-à-dire aux taux de croissance des deux groupes d'espèces, au taux de sédimentation et au taux d'érosion. Le stock d'oxygène stabilisé est surtout sensible à la valeur du stock initial des ressources en nutriments primaires. Ceci signifie que notre planète modèle (fictive) habitée par un groupe d'espèces photosynthétiques et par un groupe d'espèces qui respirent, contient intrinsèquement, dès la phase de sa première habitabilité, le dénouement de son oxygénation finale. Nous savons que l'évolution biologique par sélection naturelle est largement imprévisible, c'est ce que le biologiste et médecin américain Stuart Kauffman exprime sous le terme « *unprestatable* » (« impréconcevable ») dans son ouvrage *Au-delà de la physique*. Ceci est indiscutable en ce qui concerne la taille, la morphologie et le mode d'alimentation des organismes pluricellulaires. Aucune théorie déterministe ne peut simuler le succès évolutif des dinosaures, ni celui des mammifères après la disparition des dinosaures. On peut toutefois se demander si certains aspects primordiaux de l'évolution biologique, comme l'émergence des grands modes bioénergétiques que sont la photosynthèse et la respiration, partagés par tous les êtres vivants, n'échappe pas un peu à cette imprévisibilité. Il est en tout cas peu probable que l'autopoïèse terrestre se soit mise en place sans ces deux modes bioénergétiques primordiaux, l'un permettant le recueil de l'énergie solaire et sa mise en réserve sous forme d'énergie chimique, l'autre utilisant l'énergie chimique mise en réserve.

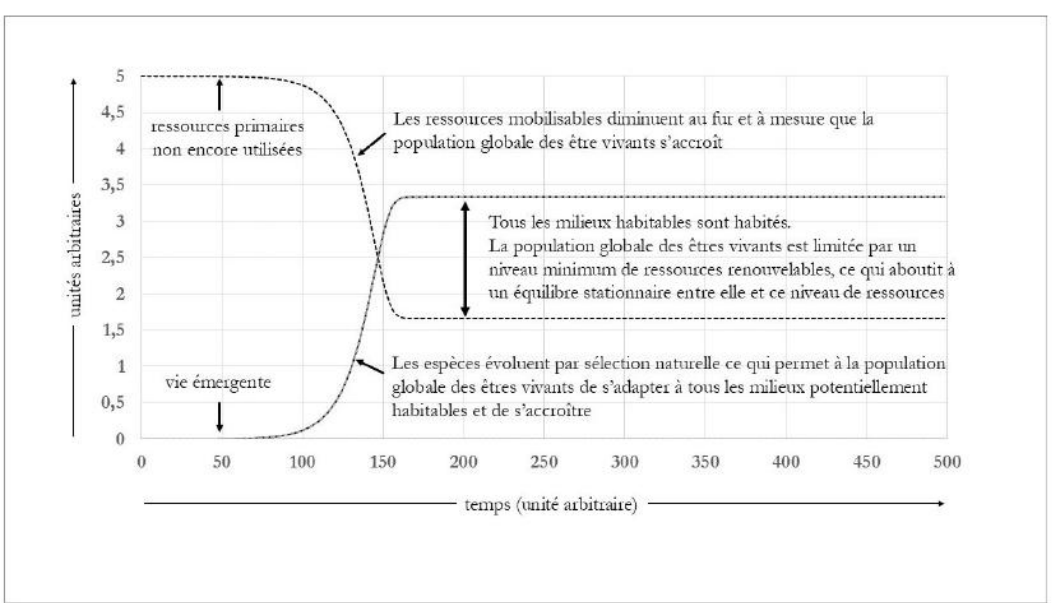
Pour aboutir à une telle situation, il a fallu une Terre avec des milieux objectivement habitables, l'émergence de la vie, des évolutions adaptatives des espèces, les actions de la tectonique des plaques et celles du climat. La régulation de l'oxygène est un résultat acquis de manière autonome par le système Terre avec pour

seule interaction avec l'Univers la transformation de l'énergie solaire. Elle est un résultat de la structuration dynamique et génétique de la matière reçue en héritage (héritage cosmique), sous l'effet des lois physiques fondamentales, des caractéristiques de sa masse et de son mouvement autour du Soleil (héritage gravitaire), de l'émergence de la vie et de la sélection naturelle (héritage génétique). C'est peut-être ainsi qu'après 4,2 milliards d'années d'existence, le système Terre a atteint au Carbonifère la plus belle expression de son autopoïèse.

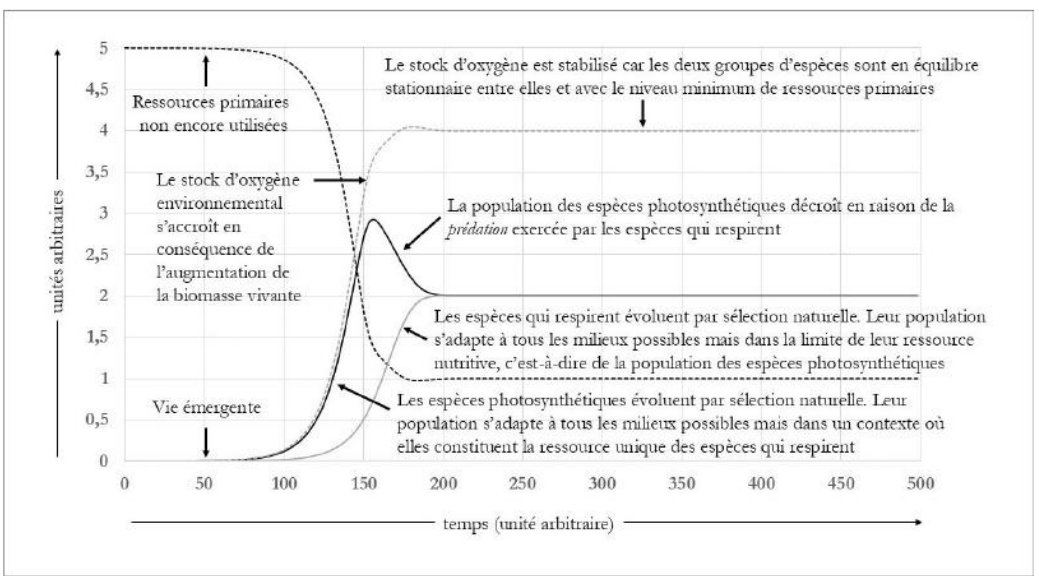
Pour clore ce long sous-chapitre consacré à la régulation de l'oxygène, il convient de se demander en quoi les activités humaines actuelles perturbent cette régulation (**Figure 6.8**). L'espèce humaine fait partie des espèces qui respirent. Nous ingérons de la nourriture constituée de végétaux et d'animaux, et nous inhalons de l'oxygène. La réaction de l'oxygène et de la matière organique produit, à l'intérieur de nos cellules, l'énergie dont nous avons besoin pour assurer notre développement, le maintien de nos régulations internes (notre santé), et nos mouvements. Mais l'humain n'est plus une espèce qui respire comme les autres depuis que ses capacités cognitives lui ont fait découvrir et exploiter les ressources de l'agriculture, puis celles de l'énergie chimique fossile. Par l'agriculture, il s'est partiellement affranchi des aléas de la chasse et de la cueillette tout en modifiant les milieux à son profit. En concevant pour l'agriculture ou pour l'industrie des machines très puissantes utilisant la matière organique sédimentaire naturellement concentrée (en gisements de charbon, pétrole, et gaz) et l'oxygène de l'atmosphère, il a démultiplié sa capacité de respirer au profit de sa capacité d'action. Le résultat de ces évolutions technologiques a été un succès évolutif sans précédent, marqué par une amélioration globale de l'alimentation et de la santé (même si certaines populations humaines n'en bénéficient pas ou trop peu), et par une explosion démographique toujours en cours. L'impact humain, depuis environ le milieu du XIX^{e} siècle, est donc celui d'une espèce qui respire biologiquement mais qui respire aussi technologiquement, de manière massive et croissante, en utilisant la matière organique sédimentaire. Dans notre schéma de principe (**Figure 6.8**), l'action humaine actuelle est donc équivalente à un accroissement brutal du taux d'érosion, donc à un recyclage accéléré de la matière organique sédimentaire. Ce phénomène a pour effet de faire décroître les stocks de matière organique sédimentaire (combustibles fossiles) et d'oxygène (dans la réalité la décroissance de la teneur en oxygène atmosphérique est relativement très faible, mais néanmoins mesurable). Les biomasses vivantes s'accroissent mais c'est probablement en faveur du monde microbien puisqu'on observe dans la réalité un

effondrement de la biodiversité des êtres pluricellulaires. On peut enfin remarquer que, même si l'impact humain actuel se poursuivait à long terme, les régulations naturelles se remettraient probablement en place, certes très lentement à l'échelle de temps des humains, mais assez rapidement à l'échelle de temps géologique. Cette remarque illustre la grande capacité de résilience ou d'attracteur du système Terre, ce qui est, avec la propriété d'émergence, un des aspects principaux de l'autopoïèse terrestre.

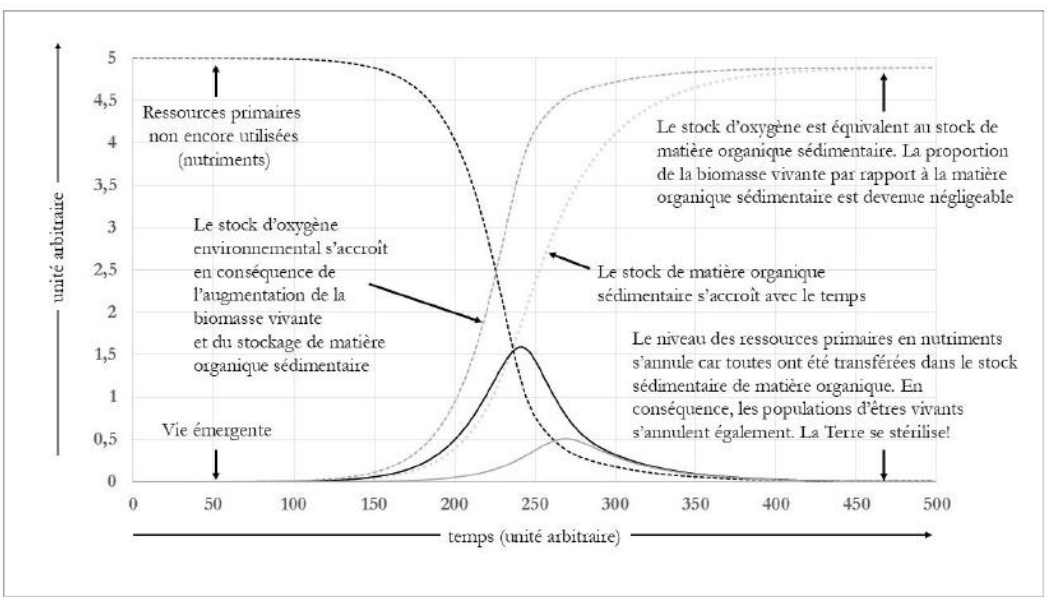
Les espèces s'adaptent progressivement à tous les milieux terrestres où règnent les conditions minimales nécessaires, c'est-à-dire celles de l'habitabilité objective (présence d'eau liquide, gamme de température, disponibilité en énergie et en nutriments). Cette extension s'achève lorsque les ressources mobilisables (espaces objectivement habitables non encore colonisés et disponibilité en énergie et en nutriments), deviennent trop faibles. Les écosystèmes locaux se structurent alors en fonction d'un équilibre stationnaire entre eux et les ressources locales qu'ils utilisent, ce qui se répercute par un équilibre stationnaire global des écosystèmes terrestres. Dans cette situation, les populations ne progressent plus et le stock de nutriments mobilisables est maintenu au niveau minimum permis par les phénomènes éventuels de recyclage.
Dans ce schéma de principe, les espèces sont supposées concurrentes par l'évolution, mais aucune d'entre elles ne sert de ressource nutritive à une autre. Il s'agit donc plutôt d'un groupe d'espèces de type autotrophe (par exemple photosynthétique). La croissance de l'ensemble du groupe est exponentielle lorsque les ressources sont très abondantes, puis elle est limitée, puis stoppée au fur et à mesure que le stock de ressources disponibles s'approche d'une limite (ici arbitrairement fixée).
Les unités en ordonnée sont arbitraires. Pour les espèces, il s'agit plutôt d'un effectif global que d'une biomasse.



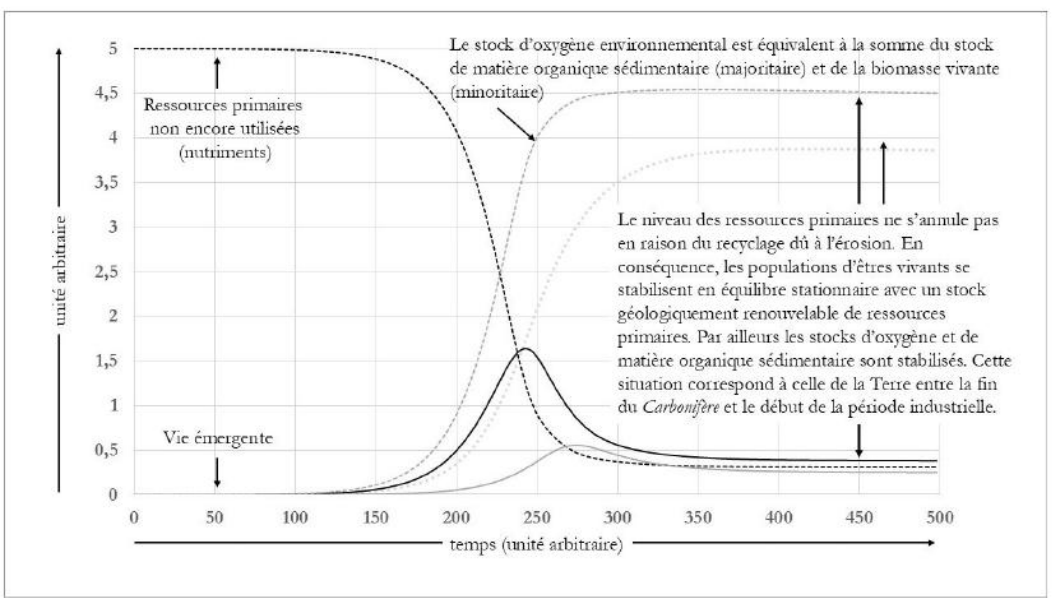
Dans ce schéma de principe, les espèces qui respirent se nourrissent des espèces photosynthétiques. Les espèces photosynthétiques étendent d'abord leur effectif en colonisant le plus de milieux possibles. Puis les espèces qui respirent en font de même en utilisant l'effectif des espèces photosynthétiques comme ressource nutritive, cet effectif limitant donc leur développement. De ce fait, l'effectif des espèces photosynthétiques est ralenti, passe par un maximum, puis décroît. Finalement, un équilibre stationnaire global s'établit entre les effectifs des deux groupes d'espèces et un certain niveau minimum des ressources primaires nutritives.


unités arbitraires
5
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
temps (unité arbitraire)
Ressources primaires non encore utilisées
Le stock d'oxygène environnemental s'accroît en conséquence de l'augmentation de la biomasse vivante
Vie émergente
Le stock d'oxygène est stabilisé car les deux groupes d'espèces sont en équilibre stationnaire entre elles et avec le niveau minimum de ressources primaires
La population des espèces photosynthétiques décroît en raison de la *prédation* exercée par les espèces qui respirent
Les espèces qui respirent évoluent par sélection naturelle. Leur population s'adapte à tous les milieux possibles mais dans la limite de leur ressource nutritive, c'est-à-dire de la population des espèces photosynthétiques
Les espèces photosynthétiques évoluent par sélection naturelle. Leur population s'adapte à tous les milieux possibles mais dans un contexte où elles constituent la ressource unique des espèces qui respirent

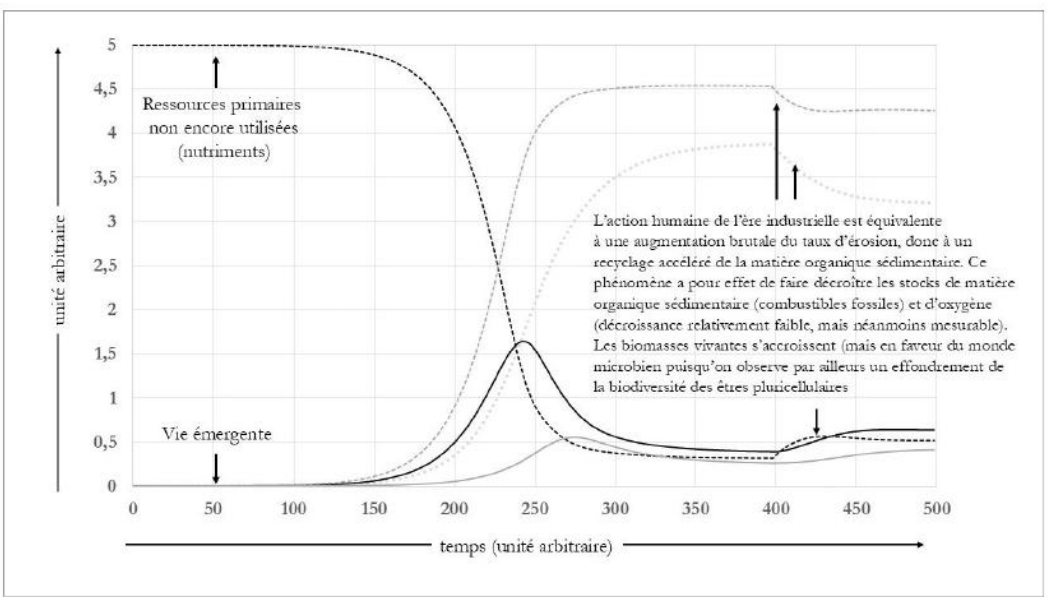
Si l'accumulation sédimentaire de matière organique ne subissait aucun recyclage, elle intégrerait la quasi-totalité des nutriments initialement disponibles, et la Terre deviendrait peu à peu stérile, ou pour le moins très peu féconde. Dans ce schéma de principe, les échanges de matière se font à masse totale constante. Les deux groupes d'espèces y sont donc quantifiés par leurs biomasses vivantes (à la différence des Figures 6.4 et 6.5 où il était plutôt question d'effectifs de populations). L'unité en ordonnée est une unité arbitraire normalisée par équivalence entre les différents réservoirs de masse. Par exemple, si le carbone est choisi comme équivalent, le réservoir d'oxygène et les biomasses vivantes expriment les quantités de carbone qui ont été respectivement mobilisées par la photosynthèse pour les produire.


unité arbitraire
5
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
temps (unité arbitraire)
Ressources primaires non encore utilisées (nutriments)
Le stock d'oxygène environnemental s'accroît en conséquence de l'augmentation de la biomasse vivante et du stockage de matière organique sédimentaire
Vie émergente
Le stock d'oxygène est équivalent au stock de matière organique sédimentaire. La proportion de la biomasse vivante par rapport à la matière organique sédimentaire est devenue négligeable
Le stock de matière organique sédimentaire s'accroît avec le temps
Le niveau des ressources primaires en nutriments s'annule car toutes ont été transférées dans le stock sédimentaire de matière organique. En conséquence, les populations d'êtres vivants s'annulent également. La Terre se stérilise!

Lorsque l'érosion s'exerce, le stock de nutriments primaires ne s'annule jamais. De ce fait, ce stock et les biomasses vivantes finissent par se stabiliser dans un équilibre stationnaire. Pour aboutir à une telle situation, il a fallu une Terre avec des milieux objectivement habitables, l'émergence de la vie, des évolutions adaptatives des espèces, les actions de la tectonique des plaques et celles du climat. C'est peut-être ainsi qu'après 4,2 milliards d'années d'existence, le système Terre a atteint au Carbonifère la plus belle expression de son autopoïèse.


unité arbitraire
5
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Ressources primaires non encore utilisées (nutriments)
Vie émergente
Le stock d'oxygène environnemental est équivalent à la somme du stock de matière organique sédimentaire (majoritaire) et de la biomasse vivante (minoritaire)
Le niveau des ressources primaires ne s'annule pas en raison du recyclage dû à l'érosion. En conséquence, les populations d'êtres vivants se stabilisent en équilibre stationnaire avec un stock géologiquement renouvelable de ressources primaires. Par ailleurs les stocks d'oxygène et de matière organique sédimentaire sont stabilisés. Cette situation correspond à celle de la Terre entre la fin du *Carbonifère* et le début de la période industrielle.
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
temps (unité arbitraire)

L'impact humain a pour effet de faire décroître les stocks de matière organique sédimentaire (combustibles fossiles) et d'oxygène. Les biomasses vivantes s'accroissent mais c'est essentiellement en faveur du monde microbien puisqu'on observe dans la réalité un effondrement de la biodiversité des êtres pluricellulaires. On peut enfin remarquer que, même si l'impact humain actuel se poursuivait à long terme, les régulations naturelles se remettraient probablement en place, très lentement à l'échelle de temps des humains, assez rapidement à l'échelle de temps géologique. Cette remarque illustre la grande capacité de résilience ou d'attracteur du système Terre, ce qui est, avec la propriété d'émergence, un des aspects principaux de l'autopoïèse terrestre.



6. La théorie Gaia

La théorie Gaia, ou hypothèse Gaia, est une idée émise dans les années 70 par James Lovelock et Lynn Margulis, selon laquelle la Terre a acquis, au cours de son évolution, des propriétés d'autorégulation semblables à celles des êtres vivants, ce qui autoriserait à comparer notre planète à un super être vivant. Cette idée étend le concept d'autopoïèse des êtres vivants à l'échelle d'un système planétaire.

L'hypothèse Gaïa a très vite été saisie par un public avide de spiritualité qui en a fait un usage et une présentation mystiques, ce qui a conduit beaucoup de scientifiques à s'en écarter trop rapidement, en négligeant ses fondements initiaux qui sont rigoureusement scientifiques. Par ailleurs, des critiques plus ciblées ont aussi été émises par des scientifiques, notamment par des évolutionnistes contemporains (néodarwiniens) comme Richard Dawkins et Stephen J. Gould.

Pour Richard Dawkins (généticien, auteur du *Gène égoïste*) la Terre ne peut être assimilée à un être vivant car elle ne se reproduit pas et n'est donc pas soumise à la sélection naturelle (des gènes). Pour lui, les gènes contrôlent *in fine* les processus évolutifs, et l'environnement n'y joue qu'un rôle mineur. Sans nier une certaine capacité d'autorégulation à la planète, il considère que l'hypothèse Gaïa est teintée de religiosité, de vitalisme, et de téléologie.

Pour Stephen J. Gould (paléontologue, auteur de la théorie des équilibres ponctués), l'évolution est rythmée par des aléas naturels qui restreignent la diversité et relancent l'évolution vers des formes de vie complexes différentes (ponctuations). Pour Gould, l'évolution n'a pas d'incidence sur l'habitabilité globale de la planète. Elle est essentiellement dictée par la sélection naturelle (comme dans la vision de Dawkins) avec des remises à plat dues aux aléas naturels. La vision de S. J. Gould s'appuie principalement sur les études paléontologiques réalisées à partir de fossiles du Phanérozoïque (datés de moins de 540 millions d'années). Elle est très probante sur cette période de temps où les fossiles sont abondants et bien préservés, et où une très grande diversité d'espèces pluricellulaires s'est établie, notamment au Cambrien (début du Phanérozoïque). Les extinctions et les croissances d'espèces y sont marquées par des innovations morphologiques (taille, motricité) et fonctionnelles (régime alimentaire, squelettes, coquilles, mode de reproduction). Mais ces évolutions maintiennent les deux grands métabolismes bioénergétiques acquis, la photosynthèse et la respiration, dont les origines sont beaucoup plus anciennes. Elles

ne font qu'introduire des raffinements et des sophistications qui améliorent le rendement de ces métabolismes, ou qui les adaptent aux nouveaux milieux à conquérir. Il n'est donc pas certain que l'évolution ancienne et primordiale qui est à l'origine fondatrice de ces deux grands métabolismes (entre –4 et –2 milliards d'années, couvrant la période de l'Archéen et le début de celle du Protérozoïque) ait été autant marquée par les ponctuations des évènements aléatoires.

James Lovelock a répondu à la critique de téléologie formulée par Richard Dawkins par l'expérience numérique Daisy World (le Monde des Pâquerettes) qui montre qu'une autorégulation peut s'établir spontanément sur la base de quelques lois physiques simples, sans aucune intention préalable. Je décris cette expérience dans le paragraphe suivant.

L'impossibilité pour la Terre de se reproduire avec variations, donc d'être soumise à la sélection naturelle, est une évidence. Mais le système Terre évolue au travers de l'évolution de ses composants internes, dont les êtres vivants. Il est donc soumis lui aussi, indirectement, à l'influence de la sélection naturelle, comme je l'ai déjà abondamment montré dans cet ouvrage.

Les controverses auxquelles l'hypothèse Gaïa a donné lieu, renvoient aussi à l'arbitraire des définitions de la « vie » et du « vivant ». Celles-ci ne trouvent pas de réponses absolues et définitives en science, ce qui oblige à les appuyer sur des concepts opérationnels mais arbitraires. L'une des définitions du « vivant », proposée par des biologistes est que le système doit disposer d'une membrane et d'un métabolisme interne. Mais selon cette définition, de nombreuses machines technologiques, comme un robot aspirateur, pourraient être considérées comme vivantes. Une seconde définition, proposée par des physiciens, est que le système doit s'autoréguler afin de développer ou maintenir la structuration interne de sa matière, et ceci en transformant de l'énergie, sujet abordé dans le chapitre 4. Mais là encore, la technologie permet de créer des systèmes répondant à cette définition. Une troisième définition est celle invoquée par Richard Dawkins, en l'occurrence l'aptitude à se reproduire et à être soumis à la sélection naturelle. Elle est probablement la plus réaliste, mais on peut lui opposer des situations comme celle d'un animal à reproduction sexuée isolé sur une Île déserte. Cet individu ne peut se reproduire et, selon la définition, il n'est donc pas « vivant » ! Dans le cadre de cet ouvrage dédié au système Terre, la définition du « vivant » doit être clairement dissociée de celle de la « vie ». Être « vivant » exige de disposer d'une enveloppe, d'un métabolisme biologique, et de l'aptitude potentielle à se reproduire. La « vie » exige

la réalisation de la reproduction et de la sélection naturelle intergénérationnelle. En d'autres termes, aucun être vivant isolé de son environnement, de ses congénères, de ses ancêtres, et de ses descendants n'est dépositaire de la « vie ». Celle-ci est un phénomène collectif et continu, qui s'appuie certes sur les êtres vivants, mais qui se propage dans le temps et dans l'espace bien au-delà des limites physiques et temporelles des êtres vivants individuels. Or, le seul système que l'on puisse considérer comme dépositaire de la « vie », depuis 4 milliards d'années, est bien le système Terre. À défaut d'être « vivante », la Terre contient des êtres vivants dont les espèces évoluent et qui, ensemble, établissent des mécanismes régulateurs en échangeant de la matière avec les autres compartiments planétaires, l'atmosphère et l'océan notamment. Ainsi, bien que la Terre ne soit pas un être vivant, elle a néanmoins la propriété de s'adapter grâce à l'évolution adaptative des espèces, c'est-à-dire celle de toute l'information génétique héritée. Cette plasticité évolutive qui tend à adapter les espèces à tous les milieux potentiellement habitables, c'est-à-dire ceux qui réunissent les conditions de l'habitabilité objective, tend aussi à maintenir les conditions d'habitabilité globale de la planète tout en les modifiant.

7. Le Monde des Pâquerettes (Daisy World)

Pour répondre à la critique selon laquelle l'hypothèse Gaïa serait téléologique, c'est-à-dire qu'elle ferait appel à un dessein imposé par une volonté extérieure au système Terre, James Lovelock a imaginé un modèle numérique simple qu'il a appelé *Daisy World* (le Monde des Pâquerettes).

L'expérimentation numérique, seul outil pour explorer l'évolution et les propriétés des systèmes complexes

Un modèle dit numérique est une simulation pas à pas d'un système dynamique, où chaque pas d'évolution entre un état à l'instant t et un état à un instant t+1 est fonction de l'état à l'instant t. Un calcul itératif pas à pas, par algorithme, permet donc de simuler l'évolution de système selon les lois prescrites, celles qui caractérisent sa dynamique. Un tel modèle est une expérience numérique. Il est appliqué lorsque la théorie, c'est-à-dire les équations qui décrivent le comportement d'un système, ne permet pas de

calculer l'état de ce système à tout moment du passé ou de l'avenir, en d'autres termes lorsque la théorie n'a pas de solution analytique (mathématique). C'est le cas pour le fameux « problème à trois corps » en interaction gravitaire newtonienne, qui a notamment été étudié par Henri Poincaré. C'est aussi le cas du système fictif de Edward Lorenz appelé « l'attracteur de Lorenz », où 3 variables supposées climatiques sont en interaction les unes avec les autres. Dans ces cas, la solution analytique n'existe pas, mais la théorie peut faire l'objet d'une itération numérique expérimentale afin de simuler l'évolution du système à partir de certaines conditions initiales (perturbations). La simulation appliquée aux mouvements gravitaires d'objets célestes permet d'obtenir de très bonnes prévisions sur une gamme de temps restreinte (passé et futur). À partir d'un grand nombre d'itérations, les résultats deviennent toutefois très sensibles aux conditions initiales, c'est l'effet papillon (ou chaos) et la prévision n'est plus fiable. L'évolution numérique du système de Lorenz montre quant à elle que le système se maintient dans un certain espace (attracteur étrange de Lorenz) à condition que les perturbations initiales qui lui sont appliquées ne soient pas trop fortes (limites du bassin d'attraction). Fortuitement, l'attracteur étrange de Lorenz ressemble à deux ailes de papillon ce qui symbolise avec élégance l'effet papillon.

La particularité majeure des systèmes complexes est que leur évolution est imprévisible et qu'une infime variation des conditions initiales peut changer cette évolution (effet papillon). Celle-ci ne peut donc être explorée qu'avec un modèle numérique.

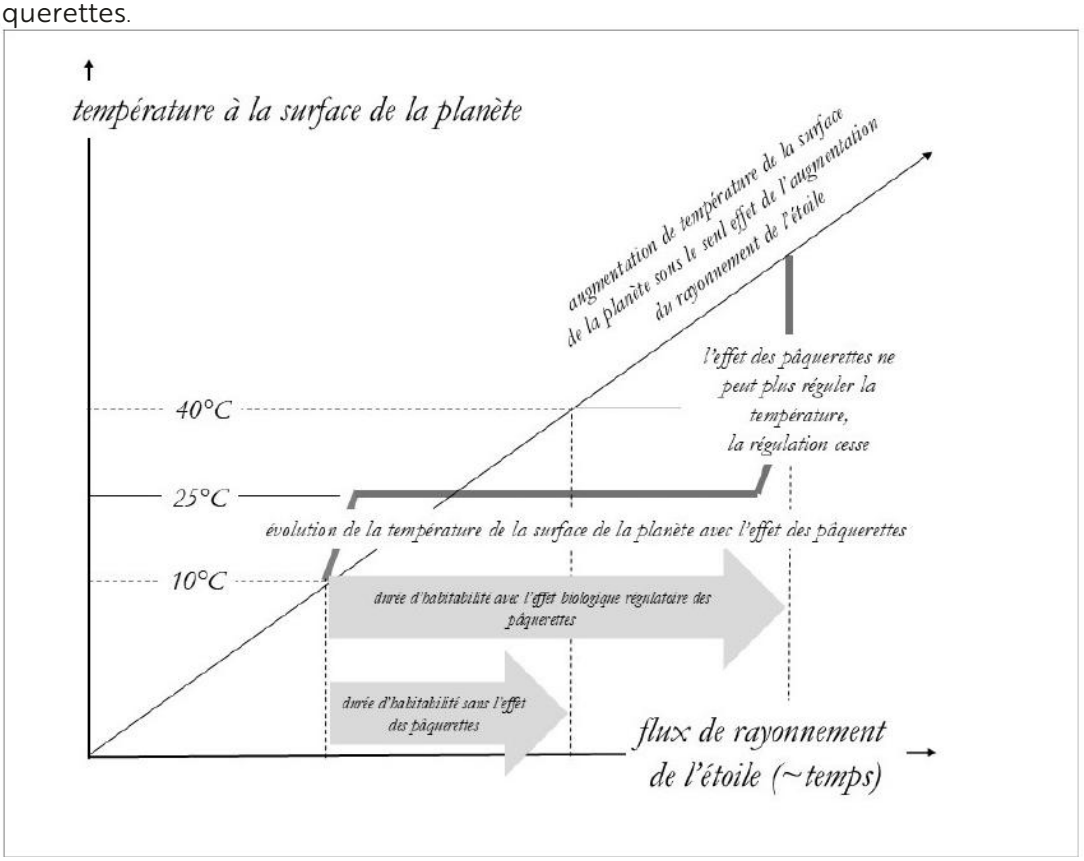
Le Monde des Pâquerettes est une planète fictive dont l'état est caractérisé par 3 paramètres physiques, la température de surface, la surface couverte par une population de pâquerettes sombres, et celle couverte par une population de pâquerettes blanches.

Les deux populations de pâquerettes ont des propriétés différentes qui influencent la température de leur environnement immédiat car l'une, la sombre, absorbe bien la lumière du soleil et réchauffe l'environnement, alors que l'autre, la blanche, réfléchit la lumière du soleil vers l'espace (propriété d'albédo) et tend donc à refroidir l'environnement. Les deux populations de pâquerettes peuvent croître dans une certaine gamme de température, ni trop basse, ni trop élevée, par exemple entre 10 et 40 °C, avec un optimum à 25 °C où le taux de croissance est maximal !

On sait par ailleurs que chaque étoile évolue et que son rayonnement augmente au fil du temps. C'est ainsi que notre Soleil a déjà augmenté son rayonnement d'environ 30 % depuis la formation du système solaire. Mais l'augmentation de température à la surface du Monde des Pâquerettes n'est pas proportionnelle à l'augmentation du rayonnement, et ceci est dû à la croissance des 2 populations de Pâquerettes (**Figure 6.9**). En effet, lorsque la température planétaire est inférieure à 25 °C, c'est la croissance de la population de pâquerettes sombres qui est favorisée car elles absorbent mieux le rayonnement et réchauffent leur environnement. En conséquence, la domination des pâquerettes sombres tend à réchauffer globalement la surface planétaire en la rapprochant de 25 °C. À l'inverse, lorsque la température planétaire dépasse 25 °C, c'est la croissance de la population de pâquerettes blanches qui est favorisée ce qui tend à modérer le réchauffement global. Au final, la planète habitée par les pâquerettes reste bien plus longtemps dans une gamme de températures habitables qu'elle ne ferait si elle n'était pas habitée. Un tel résultat est obtenu sans aucune intention. Il ne dépend que de deux lois simples prescrites. L'une est physique, c'est la loi d'absorption et réflexion de la lumière imposée par la couleur des pâquerettes. L'autre est biologique, c'est la loi de croissance des pâquerettes en fonction de la température de leur environnement.

Le système Terre est beaucoup plus structuré que le Monde des Pâquerettes et les interactions qui s'y déroulent sont beaucoup plus nombreuses (cf. chapitre 1). L'évolution de la Terre a abouti à la mise en place de régulations diverses dont certaines ont été décrites dans ce chapitre, aussi robustes, voire plus, que celle du Monde des Pâquerettes. Grâce aux propriétés régulatoires que son évolution systémique lui a permis d'atteindre, la Terre a maintenu son habitabilité thermique depuis plus de 4 milliards d'années, et a ainsi pu échapper au destin brûlant de Vénus, et à celui glacé de Mars.

Le Monde des Pâquerettes (***Daisy World***) est un modèle de planète fictive conçu par James Lovelock et destiné à montrer qu'une régulation planétaire issue d'une dynamique biologique n'est ni téléologique, ni éternelle, mais qu'elle peut augmenter considérablement la durée de l'habitabilité d'une planète. Les deux populations de pâquerettes ont des propriétés différentes qui influencent la température de leur environnement immédiat car l'une, la sombre, absorbe bien la lumière du soleil et réchauffe l'environnement, alors que l'autre, la blanche, réfléchit la lumière du soleil vers l'espace (propriété d'albédo) et tend donc à refroidir l'environnement. La dynamique des deux populations sous l'effet de l'augmentation naturelle du rayonnement de l'étoile conduit à une régulation qui anticipe et qui prolonge les conditions thermiques de l'habitabilité planétaire par rapport à une situation sans pâquerettes.


température à la surface de la planète
augmentation de température de la surface de la planète sous le seul effet de l'augmentation du rayonnement de l'étoile
l'effet des pâquerettes ne peut plus réguler la température, la régulation cesse
40°C
25°C
10°C
évolution de la température de la surface de la planète avec l'effet des pâquerettes
durée d'habitabilité avec l'effet biologique régulateur des pâquerettes
durée d'habitabilité sans l'effet des pâquerettes
flux de rayonnement de l'étoile (~temps)

CHAPITRE 7

La Terre et les humains

Et l'homme dans tout cela !

1. Le temps humain et le temps de la Terre

D'après le modèle cosmologique standard, l'univers actuel est en expansion et trouve son origine théorique dans un « Big Bang » (1), il y a 13,8 milliards d'années. Cette théorie a été initialement élaborée en 1931 par le physicien et prêtre belge Georges Lemaître, sous le nom de l'hypothèse de l'atome primitif. C'est pour se moquer de cette hypothèse que certains opposants de l'époque l'ont affublée du mot Big Bang. Pour autant, le mot est resté et l'hypothèse est toujours un pilier majeur du modèle cosmologique (et des particules) standard.

On ne peut rien connaître d'avant cette origine. Plus exactement on ne peut rien savoir d'avant l'ère de Planck (10^{-43} seconde après le Big Bang) car la physique quantique, qui participe à la conception du modèle standard, prédit que toute grandeur physique (masse, énergie, distance, temps, information) n'est pas divisible à l'infini, mais qu'il existe pour chacune d'elles une quantité insécable ou quantum. Le temps n'échappe pas à cette théorie et le quantum de temps est d'environ 10^{-43} seconde.

Par ailleurs, la théorie de la relativité prédit que le temps ne s'écoule pas de la même façon pour des observateurs en mouvement les uns par rapport aux autres, ou selon qu'ils occupent des positions différentes dans l'univers. Elle prédit aussi qu'une masse importante, comme un trou noir, déforme l'espace-temps et l'observateur qui se trouve à proximité n'a pas le même temps intrinsèque qu'un observateur éloigné de toute masse importante. L'âge de l'Univers actuel, 13,8 milliards d'années, est bien sûr évalué dans notre référentiel de temps intrinsèque et avec l'unité qui nous est propre (l'année).

Si on définit le temps écoulé entre le Big Bang et maintenant comme une année cosmique (**Figure 7.1**), le système solaire et la Terre ne se sont formés qu'au 1er septembre. Beaucoup de choses se sont passées avant, notamment la constitution

précoce des noyaux d'hydrogène, puis de nombreuses générations d'étoiles au sein desquelles ont été fabriqués, à partir de noyaux d'hydrogène et d'hélium, les noyaux de tous les autres éléments chimiques dont la Terre est faite.

Les dinosaures n'ont disparu qu'au 30 décembre. Les hominidés ne sont apparus qu'aux dernières heures de l'année cosmique. Enfin, la civilisation humaine agricole n'occupe que les 30 dernières secondes de l'année cosmique, et la civilisation industrielle est contenue dans la dernière seconde.

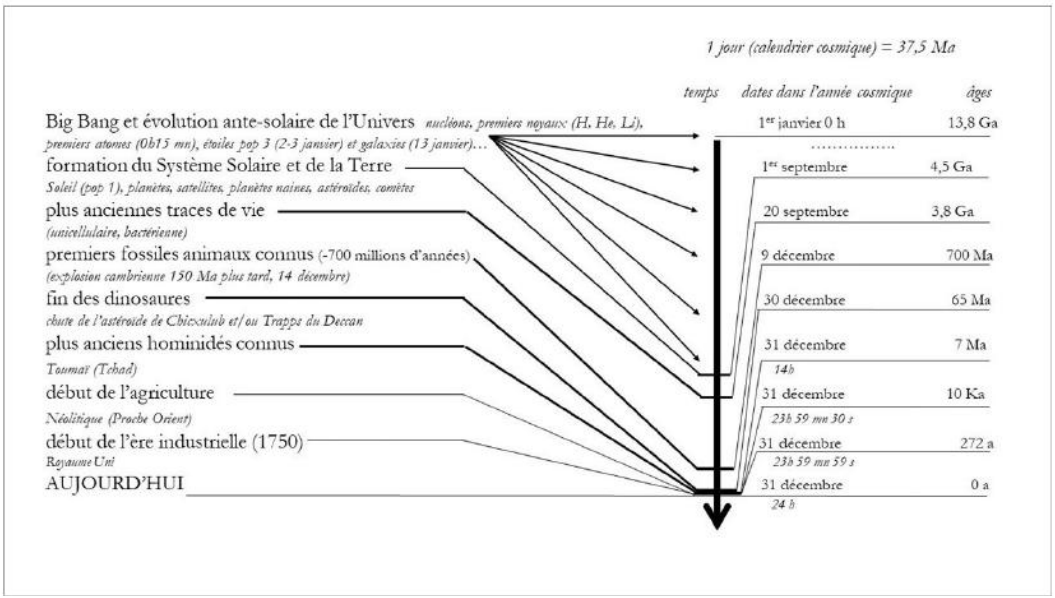
Grâce à la conservation de roches anciennes et aux fossiles qu'elles contiennent, la paléontologie a permis de décrire assez précisément les derniers 540 millions d'années de l'histoire de la Terre (Phanérozoïque, composé des ères Primaire, Secondaire et Tertiaire). Mais au-delà, c'est-à-dire pour 90 % de l'histoire terrestre, la conservation des indices paléontologiques (fossiles), minéralogiques et géochimiques est rare car les roches qui les contenaient ont été brassées par les mouvements tectoniques et souvent refondues dans le manteau terrestre. Les éléments de reconstitution historique ne sont donc que fragmentaires. Néanmoins, quelques îlots de roches ou de minéraux très anciens subsistent qui ont permis des découvertes fondamentales, comme celle de l'existence d'un océan liquide très peu de temps après la formation de la Terre, il y a 4,4 milliards d'années.

2. Notre ancêtre commun LUCA

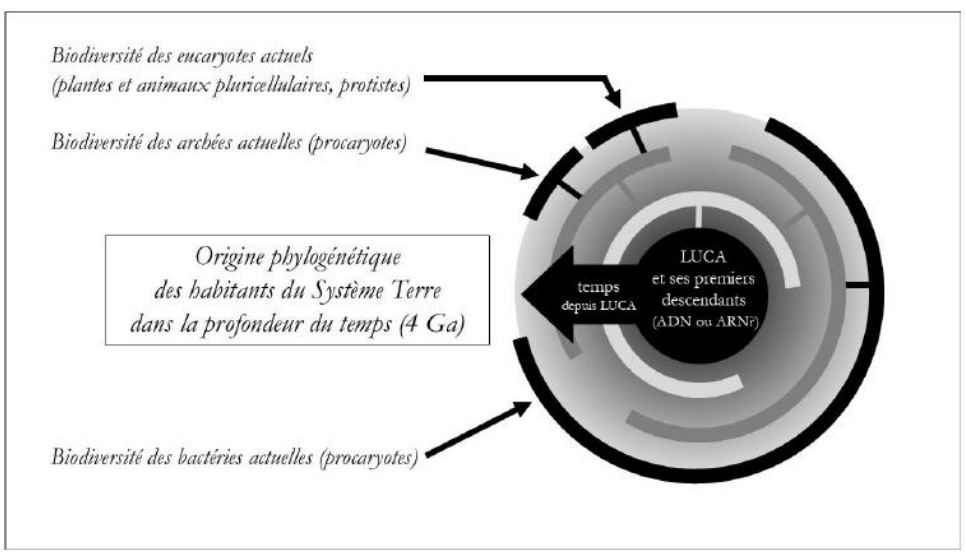
L'espèce humaine actuelle (*Homo sapiens* ou homme moderne) est, comme toutes les autres espèces d'êtres vivants, issue d'une très longue évolution commencée dès les origines de la vie, il y a environ 4 milliards d'années. Nous avons des ancêtres communs avec tous les primates, mais nous en avons aussi, plus anciens, avec tous les mammifères, encore plus anciens avec tous les vertébrés, encore plus anciens avec tous les cordés, et encore plus anciens avec les premiers animaux. Finalement, en remontant ainsi le temps le long des branches de ce buisson phylogénétique foisonnant, les généticiens se sont aperçus que tous les êtres vivants actuels, y compris les humains, avaient en commun une partie plus ou moins étendue de leur patrimoine génétique (**Figure 7.2**). Ceci signifie tout simplement que tous les êtres vivants actuels, animaux, plantes et bactéries, dérivent d'un ancêtre commun bactérien qui a été baptisé *LUCA* (Last Universal Common Ancestor, ou dernier ancêtre commun universel). *LUCA* n'était pas le premier être vivant. Il vivait il y a probablement plus de 3,5 milliards d'années, au milieu d'une biodiversité composée

d'autres espèces bactériennes, mais dont toutes les descendances évolutives se sont arrêtées au cours de l'histoire de la Terre. Seule la descendance de *LUCA* s'est propagée jusqu'à aujourd'hui. Et beaucoup des branches descendantes des espèces actuelles s'éteindront à l'avenir. Qui seront les ancêtres de la biodiversité du futur, des humains, des animaux, des plantes, ou des bactéries ? Nul ne peut le dire !

Une chronologie des principaux évènements de structuration de la matière est ici donnée selon l'idée relative des échelles de temps du calendrier cosmique de Carl Sagan (The Dragons of Eden, 1977). Dans ce calendrier cosmique, l'ère industrielle qui marque le développement accéléré de la société humaine depuis un peu plus de 270 ans, ne représente que la… dernière seconde.



Tous les êtres vivants actuels, bactéries, archées, plantes, animaux et champignons ont en commun une partie de patrimoine génétique, ce qui témoigne d'un ancêtre commun. Celui-ci a été nommé ***LUCA*** (***Last Universal Common Ancestor***) ce qui signifie que cet ancêtre n'est ni l'origine de la vie, ni même le premier ancêtre des êtres vivants actuels, mais qu'il s'agit du dernier ancêtre commun, toutes les descendances des autres ancêtres contemporains de ***LUCA*** s'étant progressivement éteintes au cours du temps. Seule la descendance de ***LUCA*** est parvenue jusqu'à aujourd'hui. Les généticiens estiment que ***LUCA*** a probablement vécu entre –4 et –3,3 milliards d'années.



3. L'habitabilité subjective des humains et sa globalisation

L'existence actuelle de l'espèce humaine tient au fait que tous les ancêtres de cette espèce ont pu vivre et se reproduire dans des milieux habitables, c'est-à-dire où les conditions minimales permettaient l'existence d'êtres vivants (habitabilité objective), et où ils ont pu s'adapter au travers de l'évolution (habitabilité subjective). L'habitabilité objective tient à quelques conditions physiques et chimiques et ne signifie pas que tous les êtres vivants peuvent s'en contenter. Par exemple, l'eau douce et l'eau de mer sont des milieux objectivement habitables, mais les poissons d'eau douce et les poissons d'eau de mer, transférés respectivement dans l'eau de mer et dans l'eau douce meurent en général rapidement. Il existe quelques exceptions, notamment celles des poissons migrateurs comme les saumons ou les anguilles qui peuvent s'adapter physiologiquement aux deux milieux. Mais en général, l'adaptation relève d'une longue évolution génétique des espèces sur de nombreuses générations et ne permet pas une transition immédiate d'un milieu à un autre.

L'habitabilité subjective de l'espèce humaine fut, à ses origines, celle d'espaces continentaux plutôt chauds, disposant de ressources en nourriture végétale ou animale. L'évolution cognitive des humains a permis ensuite à l'espèce de conquérir, donc de rendre subjectivement habitables, de nouveaux espaces dans des régions plus froides mais où des ressources alimentaires étaient néanmoins présentes. Dans un premier temps, la chasse, dotée d'instruments créés, permit de pallier l'absence ou la rareté des ressources végétales en hiver. Dans un second temps, l'agriculture et la maîtrise de technologies de conservation permirent à l'espèce d'encore mieux affronter l'hiver de ces régions.

La situation actuelle de l'espèce humaine est caractérisée par le fait qu'elle a conquis tous les milieux de la planète. Grâce à sa technologie à la mobilisation d'énergie fossile, et à l'organisation des stocks et des transports de ressources, l'être humain peut désormais, potentiellement, s'installer partout, depuis les grands fonds marins en passant par les étendues glacées de l'Antarctique, en orbite autour de la Terre et même sur la Lune. Cette extension de la sphère habitable des humains va au-delà des limites de l'habitabilité objective puisque, par exemple, il n'y a pas d'eau liquide au centre de l'Antarctique, ni dans l'espace, ni sur la Lune. Mais les limites de l'habitabilité de la Terre par des humains existent néanmoins. Elles leur sont désormais imposées par l'inadéquation entre la progression démographique de

l'humanité et la disponibilité des ressources mobilisables, locales ou globales, que ce soit en énergie ou en matières premières. Dans de nombreuses situations les effectifs humains sont étroitement dépendants de la mobilisation des ressources. C'est notamment le cas de tous les milieux urbains, et particulièrement des grandes métropoles ou vivent des dizaines de millions de personnes.

4. L'extraordinaire capacité acquise par les humains de mobiliser l'énergie

Depuis 4 milliards d'années, les êtres vivants qui furent nos lointains ancêtres ont acquis de nombreuses capacités. Ces acquisitions furent autant de réponses adaptatives aux changements des milieux de vie et à l'évolution des espèces concurrentes.

Dans la dynamique évolutive, qui n'avance pas recule ! C'est ce qu'exprime la métaphore de la « course de la Reine rouge » en référence au conte *Alice au Pays des Merveilles* de Lewis Carol. À un moment de ce conte, Alice et la Reine rouge courent ensemble devant un paysage immobile. Alice demande à la Reine rouge pourquoi le paysage ne change pas et celle-ci lui répond « nous courons pour rester sur place ». Les espèces sont engagées dans la « course de la Reine rouge » au sens où, celles qui ne courent pas (ne s'adaptent pas), ou trop lentement, sont vouées à disparaître au bout d'un certain nombre de générations, remplacées par des espèces concurrentes plus adaptées.

Le simple fait que nous soyons là aujourd'hui atteste que les espèces successives dont nous sommes issus ont toujours été dans la course, celle de la Reine rouge. Nous bénéficions d'adaptations très anciennes, mais fondamentales, celle de respirer l'oxygène par chacune de nos cellules et d'en tirer un bénéfice énergétique pour nos mouvements et notre réflexion, celles de capter l'oxygène à partir de l'atmosphère et de le redistribuer à chacune de nos cellules par les fonctionnalités nerveuses et motrices internes de notre corps. Mais l'adaptation humaine ne s'est pas arrêtée là ! En effet, l'extension récente de nos capacités cognitives depuis quelques dizaines de milliers d'années nous a permis d'amplifier considérablement notre capacité de mobiliser l'énergie et de traiter l'information. Certaines des machines que nous savons construire peuvent être pilotées par un seul être humain, voire par un robot, et faire un travail équivalent à celui de milliers d'êtres humains dotés de leurs seules mains. Nos machines sont en fait des convertisseurs d'énergie. La plupart d'entre

elles transforment l'énergie que nous leur fournissons en mouvement et en chaleur. Elles ont surtout été alimentées depuis 2 siècles par l'énergie chimique fossile, celle qui se dégage lorsque nous soumettons la matière organique sédimentaire (pétrole, gaz, charbon, schistes bitumineux ou sables asphaltiques) à l'oxydation par l'oxygène de notre atmosphère. Elles utilisent aussi, désormais, mais encore trop peu, l'énergie électrique produite par transformation de l'énergie solaire (photovoltaïque, éolienne, hydraulique, de la houle). Elles utilisent enfin l'énergie électrique produite par la fission nucléaire de noyaux lourds instables comme celui de l'uranium, qui nous ont été légués par de très anciennes explosions d'étoiles massives, avant même la formation du système solaire.

Grâce aux innovations technologiques issues de ses capacités cognitives, l'humain a pu démultiplier le champ de son action. Il a défriché et cultivé d'immenses étendues agricoles, il a construit des mégalopoles, il a développé son savoir scientifique, technologique, et culturel, il a amélioré l'état sanitaire de beaucoup de populations et réduit fortement la mortalité au point que l'effectif de la population humaine a été multiplié par 5 en 80 ans, soit la durée moyenne d'une vie humaine dans les pays les plus développés.

Cet extraordinaire succès évolutif a cependant ses aspects négatifs et pervers. En effet, dans beaucoup d'endroits qui ne bénéficient pas pleinement du développement technologique, le corolaire de ce succès démographique est une surpopulation qui accroît la pauvreté, la malnutrition, les maladies, et les conflits pour deux aspects très liés, le pouvoir et les ressources.

Par ailleurs, le niveau de vie civilisé auquel nous aspirons tous, celui d'êtres humains correctement nourris, logés, soignés, protégés, éduqués, divertis, est extrêmement consommateur d'énergie et de matières premières. Or notre expansion démographique, combinée à notre progrès technologique et à notre besoin toujours croissant de consommation, n'est aujourd'hui plus compatible avec la disponibilité des ressources géologiques (internes à la planète) ni même avec celle des ressources renouvelables (provenant de l'extérieur de la planète). Nous consommons les ressources à un rythme auquel la nature ne les renouvelle pas. La conséquence est donc, inéluctablement, un épuisement des stocks de ressources et une pénurie prévisible dans un avenir proche.

L'une de ces ressources est l'énergie chimique fossile, celle que détiennent conjointement l'oxygène accumulé dans notre atmosphère et la matière organique accumulée dans les sédiments de la Terre. Lorsque nous libérons cette énergie

chimique fossile pour la transformer en mouvement ou en chaleur, nous produisons du gaz carbonique (CO_2) et de l'eau (H_2O), ces mêmes composés que la photosynthèse utilisa il y a des dizaines ou centaines de millions d'années. La consommation technologique d'oxygène par les êtres humains se ressent assez peu (elle est néanmoins mesurable) car le flux consommé est très faible au regard de l'énorme stock d'oxygène accumulé. Mais il n'en est pas de même pour la production de gaz carbonique. En effet, le CO_2 est en traces dans l'atmosphère, et son injection par les activités humaines modifie sensiblement et rapidement sa concentration. Comme c'est un gaz à effet de serre, efficace et stable, cette injection se répercute immédiatement et durablement sur le climat.

Enfin, une conséquence néfaste du succès évolutif récent des humains est l'éviction, partielle ou totale, de très nombreuses espèces animales et végétales dont nous avons réduit, supprimé ou pollué les milieux de vie, ou que nous avons surexploitées en tant que ressources alimentaires. La perte de biodiversité n'est pas en elle-même un problème insurmontable pour la planète. Celle-ci a déjà connu des aléas naturels qui ont abouti à un résultat similaire. Mais le temps a permis à la dynamique évolutive de reconstruire une biodiversité en faisant émerger de nouvelles espèces. La perte actuelle de biodiversité, très rapide, est toutefois un énorme problème pour l'humanité car la résilience évolutive naturelle ne jouera pas à l'échelle de temps des phénomènes humains.

5. L'impact de l'humain sur ses milieux de vie

La particularité de l'évolution humaine depuis 10 000 ans, alors que la population n'était que d'environ 2 millions d'individus, est d'avoir adapté ses milieux de vie plutôt que de s'y adapter. Certes les êtres humains restaient liés aux surfaces continentales et à l'air qu'ils respiraient, mais ils modifiaient leurs propres habitats afin d'en optimiser les ressources nutritives. C'est ainsi qu'ils défrichèrent pour les besoins de l'agriculture naissante et se sédentarisèrent dans les zones défrichées. C'est ainsi qu'ils se regroupèrent ensuite pour faciliter les échanges de savoirs, de matières premières et d'objets, initiant les cités et l'organisation urbaine. Bien entendu, beaucoup d'implantations de population furent liées à la préexistence de ressources naturelles, que ce soit l'eau (des océans, des fleuves et des lacs), les terres fertiles, les gisements d'argiles ou de métaux (fer, cuivre, or...). Le premier impact majeur de l'humanité sur ses milieux de vie fut donc de les transformer pour les

adapter à ses besoins. Par-là, les milieux devinrent moins favorables aux autres espèces, à quelques exceptions près, qui se replièrent sur les milieux de vie non exploités par les humains, ou disparurent. Bien évidemment, cet impact n'a jamais cessé et s'est fortement accru avec l'explosion démographique et le développement technologique des humains. Aujourd'hui la plus grande partie des milieux de vie continentaux habitables a été transformée et les habitats des espèces sauvages, c'est-à-dire non domestiquées par les humains, ont été considérablement réduits. C'est une des causes majeures de l'effondrement actuel de la biodiversité.

Tous les êtres vivants produisent des déchets liés à leur physiologie (urine, matières fécales) ou à leur mode de vie, de reproduction et de mort (carcasses de proies, placenta, feuilles sénescentes, cadavres). Mais, depuis le début de l'agriculture (Néolithique, il y a environ 10 000 ans) les activités humaines produisent de nombreux autres déchets dont la diversité et le volume n'ont jamais cessé de s'accroître.

La mécanisation fondée sur l'énergie chimique fossile, quels que soient ses usages, rejette du CO_2 dans l'atmosphère. Les industries minières, sidérurgiques, et chimiques produisent des matériaux utiles et des déchets chimiques. Beaucoup des matériaux utiles, comme les métaux ou les matières plastiques, ne sont pas recyclés par les humains. Ils finissent donc ultimement en déchets que la nature mettra plus ou moins longtemps à recycler naturellement.

L'industrie nucléaire de production d'électricité génère des déchets radioactifs à courte mais aussi à très longue période (des centaines de milliers d'années ou plus). Ces derniers sont regroupés dans des espaces de stockage qu'il faudra contrôler sur les mêmes durées, ce qui, à l'échelle de temps de l'humanité, signifie pour l'éternité.

L'organisation actuelle des activités humaines repose sur le transport de marchandises par exemple pour acheminer les aliments et les produits manufacturés sur leurs lieux de consommation, les matières premières sur leurs lieux d'utilisation industrielle, les engrais et les pesticides sur leurs lieux d'utilisation agricole. Tous ces transports émettent d'énormes quantités de CO_2 dans l'atmosphère. Même les transports immatériels d'information numérisée, générés par la dernière phase du développement technologique de l'humanité, émettent de grandes quantités de CO_2 en raison de l'énergie que demande le fonctionnement des réseaux et des énormes serveurs dédiés au stockage et au traitement des données.

Les déchets issus des activités humaines polluent localement l'air, l'eau, les sols et les nappes phréatiques, ce qui altère l'habitabilité des milieux de vie locaux. Certains épisodes de pollution aquatique ont été particulièrement graves. Ce fut par exemple le cas dans la baie de Minamata au Japon, entre 1949 et 1955 où des rejets industriels, notamment des composés du mercure (Hg) ont provoqué plus d'un millier de morts, ainsi que des milliers de malades, de grossesses anormales et interrompues, et de malformations congénitales. On peut également citer la pollution urbaine causée par les émissions de gaz (dioxyde d'azote ou de soufre, ozone) ou de microparticules des véhicules. Le nombre de décès annuels prématurés liés à ce type de pollution se réduit un peu, mais il est encore estimé à plusieurs centaines de milliers à l'échelle européenne.

Mais certains déchets ont aussi un effet global. C'est le sujet du paragraphe suivant.

6. L'impact humain sur le climat et l'environnement global

Lorsque des déchets chimiques sont stables, et qu'ils sont massivement émis dans l'océan ou dans l'atmosphère, ils peuvent engendrer des conséquences globales. En effet l'océan et l'atmosphère subissent un brassage convectif permanent qui distribue largement les polluants à partir de leurs sources locales.

Par exemple le CO_2 est très stable et ses émissions vers l'atmosphère par les activités humaines et les volcans excèdent les sorties naturelles possibles comme l'absorption par l'océan. Le CO_2 s'accumule donc peu à peu dans l'atmosphère, ce qui se traduit par l'augmentation de sa teneur moyenne et de l'effet de serre associé, dont la conséquence est le réchauffement climatique global actuel. Cette accumulation est mesurée depuis 1959 à l'observatoire du Mauna Loa à Hawaï (**Figure 7.3**), situé à 4 000 m d'altitude, au milieu du Pacifique, donc éloigné de toute source locale importante de CO_2.

Puisque des sources naturelles de CO_2 existent, et que le climat a connu de nombreuses variations naturelles dans le passé, un argument climato-sceptique est de nier le rôle prépondérant des activités humaines dans le changement climatique que l'on observe depuis quelques dizaines d'années. Aucun article à l'appui de cette thèse n'a jamais été publié dans une revue scientifique internationale car cette affirmation climatosceptique ne peut faire état de résultats expérimentaux ou observationnels, contrairement aux milliers d'articles qui, depuis plus de 50 ans, ont

étayé la réalité et la causalité du changement climatique actuel. Les expressions climatosceptiques d'aujourd'hui ne s'appuient pas sur des arguments rationnels mais s'inscrivent dans une posture négationniste et propagandiste, affirmée et assumée. Si un débat rationnel et documenté avec les climatosceptiques n'est plus possible, il est toutefois important de présenter aux lecteurs de ce livre l'un des principaux arguments scientifiques montrant la responsabilité des activités humaines dans l'augmentation très rapide de l'effet de serre du système Terre, cause du changement climatique actuel.

Les modèles climatiques, fondés sur des principes physiques rigoureux, sont parmi les modèles scientifiques les plus sophistiqués et les plus aboutis. Ils ont commencé à être élaborés dans les années 80 et n'ont jamais cessé d'être améliorés et testés. Des exercices internationaux d'inter-comparaison des différents modèles existants ont été régulièrement organisés depuis 1995 et le sont toujours afin de continuer à améliorer ces modèles. C'est le projet CMIP (Coupled Model Intercomparaison Project) dont le dernier exercice (CMIP 6) a réuni 100 modèles issus de 50 centres de recherche. Un des buts de ces exercices est de faire travailler tous ces modèles sur la base de conditions d'entrée similaires, connues grâce à des archives paléoclimatiques naturelles ou historiques, et de leur demander de reproduire l'évolution ultérieure qui nous est également connue grâce à ces mêmes archives. C'est ainsi que les modèles utilisés pour les projections du climat futur par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du Climat, en anglais IPCC, Intergovernemental Panel on Climate Change) sont tous capables de reproduire les évolutions naturelles des climats passés avec une grande fiabilité. Lorsqu'on demande à ces modèles de reproduire les évolutions climatiques de la période récente depuis les années 60, ils sont incapables de le faire s'ils n'intègrent pas comme données d'entrée les contraintes d'émission de gaz à effet de serre liées aux activités humaines (**Figure 7.4**). En bref, le climat ne changerait pas aussi rapidement sous la seule contrainte des causes naturelles, c'est-à-dire si nous n'émettions pas de gaz à effet de serre par nos activités. Même s'il en existe beaucoup d'autres, cet argument est le plus percutant pour démontrer l'écrasante responsabilité des activités humaines dans le rapide changement climatique actuel.

C'est à l'initiative de Charles Keeling, chercheur de la SCRIPPS Oceanographic Institution à l'Université de San Diego, qu'un observatoire des teneurs en gaz carbonique de l'atmosphère a été mis en place au sommet du mont Mauna Loa à Hawaï dès 1958, sous l'égide de la SCRIPPS et de la NOAA (agence fédérale des États-Unis responsable de l'étude de l'océan et de l'atmosphère). Ces mesures ont été acquises en continu depuis 1959 et montrent une augmentation moyenne constante, les valeurs étant passées d'environ 315 ppm (parties par million) à 426 ppm en janvier 2025. Les fluctuations saisonnières de ces valeurs sont dues à la répartition inégale des continents et des océans dans les 2 hémisphères. L'hémisphère nord (boréal) contient davantage de surfaces continentales soumises à la sénescence saisonnière de la végétation, si bien que l'effet global sur les teneurs en CO_2 est marqué par la saisonnalité boréale. L'observatoire atmosphérique du Mauna Loa a été choisi en raison de son éloignement des sources locales d'émissions de CO_2 (à 3 360 m d'altitude, au milieu de l'océan Pacifique). Il est donc représentatif de la teneur moyenne de l'atmosphère en CO_2. Depuis les débuts historiques de 1959, de nombreux autres observatoires et des satellites dédiés au CO_2 ont été déployés. Cet important réseau international vise non seulement à suivre la teneur moyenne du CO_2 atmosphérique, mais également celle d'autres gaz à effet de serre (méthane, oxydes d'azote et de soufre), la distribution et l'intensité des sources locales ou régionales d'émission, la dynamique de diffusion à l'ensemble de l'atmosphère, et les éventuels processus d'absorption régionaux.

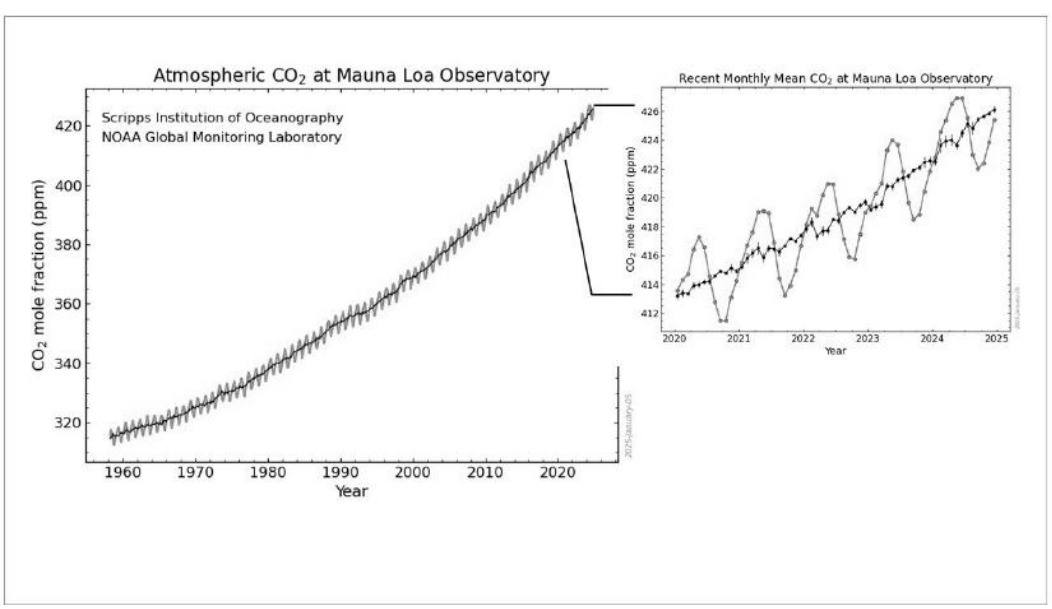
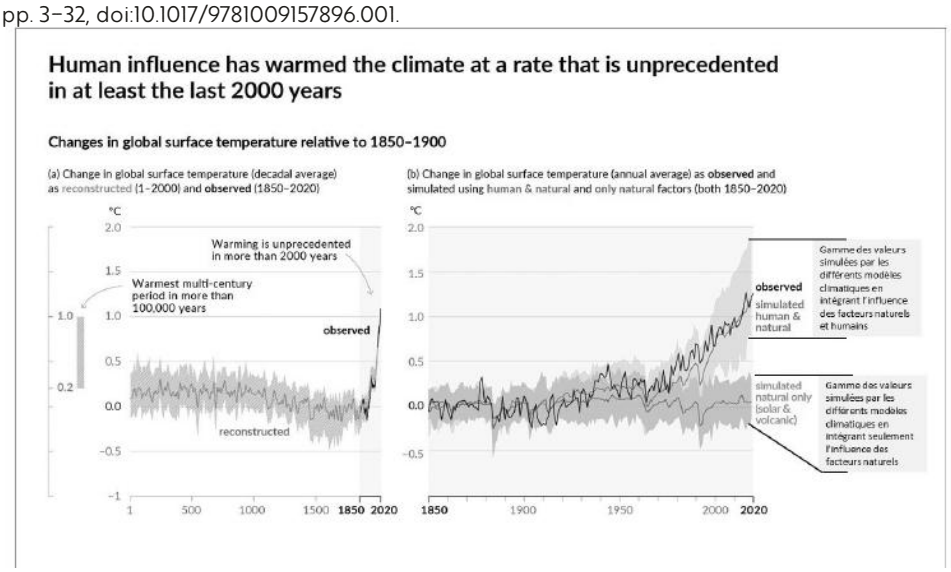

Atmospheric CO2 at Mauna Loa Observatory
Scripps Institution of Oceanography
NOAA Global Monitoring Laboratory
CO2 mole fraction (ppm)
Year
Recent Monthly Mean CO2 at Mauna Loa Observatory
CO2 mole fraction (ppm)
Year

Figure 7.4. L'influence humaine sur le changement climatique actuel

Lorsqu'on demande aux modèles climatiques de reproduire les évolutions de la période récente depuis 1960, ils sont incapables de le faire s'ils n'intègrent pas comme données d'entrée les contraintes d'émission de gaz à effet de serre liées aux activités humaines. Ceci signifie que le climat ne changerait pas aussi rapidement sous la seule contrainte des causes naturelles, c'est-à-dire si nous n'émettions pas de gaz à effet de serre par nos activités.

Les modèles climatiques intègrent les bases de la mécanique des fluides, de la physico-chimie, de la météorologie, ainsi que de nombreux aspects biologiques qui interagissent avec l'environnement. Ils appliquent ces bases sur une grille spatiale où chaque élément de la grille interagit avec ses voisins. La grille elle-même est un modèle de terrain qui tient compte de la topographie des surfaces émergées et de celle du fond des océans. Les modèles sont élaborés par différents laboratoires de recherche sur le climat et la météorologie, ainsi que par une intense coopération internationale incluant régulièrement des exercices d'inter-calibration. Ils peuvent se distinguer par des résolutions spatiales ou temporelles différentes, par un type de grille différent, par la prise en compte plus ou moins forte de certains aspects non physiques (biologie, biogéochimie, sédimentation), ainsi que par des valeurs différentes de certains paramètres fondamentaux du modèle (paramétrisation). Les simulations se font par itération numérique à partir des contraintes ou des scénarios de contraintes que l'on souhaite tester (entre autres les contraintes radiatives liées aux concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère).

Figure adaptée issue du rapport IPCC, 2021 : Summary for Policymakers. In: ***Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.


Human influence has warmed the climate at a rate that is unprecedented in at least the last 2000 years
Changes in global surface temperature relative to 1850–1900
(a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1–2000) and observed (1850–2020)
(b) Change in global surface temperature (annual average) as observed and simulated using human & natural and only natural factors (both 1850–2020)
°C
Warming is unprecedented in more than 2000 years
Warmest multi-century period in more than 100,000 years
observed
reconstructed
observed
simulated human & natural
simulated natural only (solar & volcanic)
Gamme des valeurs simulées par les différents modèles climatiques en intégrant l'influence des facteurs naturels et humains
Gamme des valeurs simulées par les différents modèles climatiques en intégrant seulement l'influence des facteurs naturels

Un autre exemple d'impact humain sur l'environnement global est celui des émissions de chlorofluorocarbures (CFC) qui étaient très largement utilisés dans les réfrigérateurs dans la seconde moitié du xx^{e} siècle. La dispersion de ces composés volatiles dans l'atmosphère les amenait jusqu'à la stratosphère où leur décomposition sous l'effet du rayonnement solaire ultraviolet engendrait la destruction concomitante de la couche d'ozone stratosphérique. Les CFC ont été interdits dans les pays les plus développés à partir de 1996, et des effets positifs de reconstruction de la couche d'ozone commencent à être observés par des instruments embarqués sur des satellites.

Un troisième et dernier exemple est celui de l'accumulation de métaux lourds dans les organes des êtres vivants, les muscles, le foie, ou les tissus nerveux. Les sources de métaux lourds sont locales car elles se situent dans les grands centres urbains ou industriels. Or, des contaminations aux métaux lourds se retrouvent dans des animaux qui vivent très loin de ces sources, notamment dans les zones polaires. La dispersion se fait ici au travers du réseau trophique (terme préféré à celui de chaîne alimentaire qui évoque un fonctionnement trop linéaire). Des proies sont contaminées et voyagent, puis sont consommées ailleurs par des prédateurs qui sont contaminés à leur tour, souvent avec un effet amplificateur. Ainsi, de proche en proche, de proies en prédateurs, et de prédateurs en super-prédateurs, ou de prédateurs en consommateurs de cadavres qui sont eux-mêmes des proies, la contamination gagne des zones que l'on aurait pu croire exemptes de toute pollution.

7. L'impact humain sur la biodiversité et ses conséquences

La biodiversité au sens large est à la fois celle des individus et celle des espèces. Mais lorsqu'on évoque ce terme pour souligner la richesse biologique d'un écosystème, les grandes extinctions du passé ou celle qui est en cours, c'est implicitement de la diversité des espèces qu'il s'agit. Or la notion d'espèce est un concept imprécis dès qu'il s'agit de situer l'apparition ou la disparition d'une espèce, ou de distinguer deux espèces génétiquement proches. Certes on sait qu'un chien n'est pas un chat, mais à quel moment les deux espèces sont-elles apparues à partir de leur ancêtre commun ? Inversement, à quel moment l'espèce à laquelle appartenait l'ancêtre commun des premiers singes et des premiers hominidés a-t-elle cessé d'être une espèce ? Il n'y a pas de réponse précise à ces questions, d'autant que la distinction entre une espèce et une autre peut-être extrêmement ténue. C'est

notamment le cas au moment où se produit une divergence, c'est-à-dire la propagation d'une nouvelle particularité génétique au sein d'une population. Un critère opératoire souvent choisi par les biologistes est l'interfécondité. Selon ce critère, une nouvelle espèce apparaît lorsque la divergence génétique est devenue trop importante pour que les individus de la nouvelle branche puissent se reproduire avec ceux de la branche initiale. Les deux populations évoluent alors indépendamment en accroissant la distance génétique qui les sépare.

Mais le critère d'interfécondité ne vaut que pour les êtres vivants à reproduction sexuée. Or une grande partie du monde vivant est composée d'êtres unicellulaires qui ne se reproduisent pas par la voie sexuée (bactéries, archées), même s'ils échangent des gènes autrement. Il faut alors des critères différents pour définir leurs espèces. Par ailleurs, le critère d'interfécondité n'est pas toujours opératoire même chez les êtres vivants pluricellulaires. Par exemple, deux espèces de plantes peuvent aisément s'hybrider et produire une descendance fertile.

Les critères utilisés pour définir les espèces dans un grand groupe d'êtres vivants, bactéries, animaux ou plantes, peuvent être très différents de ceux utilisés pour un autre groupe. La conséquence est que, si l'on quantifie la biodiversité des groupes par le nombre d'espèces qui y ont été recensées, les chiffres ne sont pas directement comparables puisqu'ils n'ont pas la même signification opératoire.

Enfin, il faut souligner que les espèces ne forment pas des populations uniformes et qu'elles sont elles-mêmes composées de sous-ensembles (sous-espèces, variétés, écotypes) issus d'adaptations à des environnements différents.

La quantification d'une perte de biodiversité des espèces est donc un exercice difficile, dont l'aboutissement est imprécis. D'une part, l'inventaire exhaustif des espèces existantes et disparues est illusoire. D'autre part, le flou du concept d'espèce oblige à des choix de critères opératoires arbitraires. Néanmoins, malgré ces difficultés conceptuelles, de grands efforts internationaux d'inventaire et d'observation de certaines espèces de plantes et d'animaux ont été déployés en utilisant plutôt des « indicateurs » de la biodiversité. Les résultats montrent clairement un fort recul de la biodiversité provoqué par le développement des implantations et des activités humaines. D'après l'Office français de la Biodiversité, 68 % des populations de vertébrés ont disparu entre 1970 et 2016, 40 % des espèces d'insectes sont en déclin, 75 % des milieux terrestres sont altérés de façon significative et plus de 85 % des zones humides ont été détruites. Sur la base d'une étude internationale publiée dans la revue *Biological Reviews*, le muséum national d'Histoire

naturelle souligne que 7,5 à 13 % des espèces animales et végétales auraient disparu dans le monde depuis l'an 1500, avec bien sûr une forte accélération dans la période récente. Appliqué à l'ensemble des êtres vivants, 150 000 à 260 000 espèces se seraient éteintes.

Cette réduction actuelle de la biodiversité est désormais caractérisée comme la 6e extinction massive en raison de son ampleur. La précédente extinction massive, la 5e, marque la limite entre l'ère Secondaire (qui se termine par le Crétacé) et l'ère Tertiaire (qui commence par l'Eocène). Elle s'est produite il y a 65 millions d'années, inclut la disparition de la plupart des espèces de dinosaures ainsi que beaucoup d'autres espèces. Comme les causes de la 6e extinction sont toutes inhérentes au développement des activités humaines, il a été proposé de créer une nouvelle période géologique appelée l'Anthropocène, mais dont le début ne fait pas encore consensus.

Pour certains scientifiques, des extinctions de faune liées à l'activité humaine sont déjà perceptibles dans des enregistrements fossiles datés de 50 000 ans. D'autres associent le début d'une influence humaine significative au début de l'agriculture il y a environ 10 000 ans (début du Néolithique), avec plusieurs phases d'intensification successives. Le début de l'industrialisation, entre 1750 et 1900 selon les régions, accéléré par l'utilisation de l'énergie chimique fossile (combustion du charbon, puis du pétrole et du gaz avec l'oxygène de l'air), est aussi proposé comme limite inférieure de l'Anthropocène. Le développement des activités humaines s'est considérablement accéléré au XXe siècle avec l'urbanisation, les progrès technologiques et la croissance démographique. D'autres scientifiques ont donc proposé que le début de l'Anthropocène soit conventionnellement marqué par les explosions de bombes nucléaires entre 1945 et les années 60. Les éléments radioactifs émis par ces explosions, carbone 14 (^{14}C) ou autres radionucléides, se fixent dans les sédiments et pourraient ainsi servir de marqueurs chronostratigraphiques, de la même façon que les teneurs en iridium pour la limite Crétacé-Tertiaire, ou que des couches de cendres volcaniques pour d'autres limites.

Les causes de la 6e extinction sont multiples. Pour beaucoup d'espèces, la diminution drastique des effectifs, ou même l'extinction, a été provoquée par la restriction des habitats continentaux en raison des espaces mobilisés par les humains pour leurs implantations urbaines et agricoles. Mais la quasi-disparition de certaines espèces dans certaines régions est due à leur surexploitation par la chasse ou la pêche (par exemple la morue sur les grands bancs de Terre-Neuve, ou la sardine dans le golfe de Gascogne, ou le bison en Amérique du Nord), ou par l'éradication pour

cause de nuisibilité (comme le loup en Europe occidentale), ou par la concurrence d'espèces invasives introduites par les humains, ou par la dégradation des milieux de vie en raison de la pollution. Enfin, le changement climatique actuel, dont les causes sont humaines, oblige souvent les espèces à se déplacer. Mais elles ne peuvent le faire avec succès que si elles disposent de corridors naturels ou aménagés leur permettant d'accéder éventuellement à des régions plus favorables si celles-ci existent. C'est ce qu'on appelle la connectivité écologique. La programmation intégrée du développement des infrastructures humaines et de l'occupation de l'espace n'a pas encore réellement pris en compte de telles considérations.

Le recul de la biodiversité est non seulement une perte de patrimoine naturel, mais il a, et aura, de lourdes conséquences pour les humains.

Un premier risque majeur est celui de la malnutrition régionale, ou même mondiale. D'un côté les stocks de ressources alimentaires issues de la pêche ou de la chasse s'épuisent. D'un autre côté, l'agriculture intensive épuise les sols tandis que les espèces qui les fertilisent disparaissent (insectes, vers, champignons, bactéries). Le modèle substitutif consistant à apporter toujours plus d'intrants (engrais chimiques et pesticides), et à traiter mécaniquement les sols, a un coût énergétique important et se heurte lui aussi à l'horizon limité des ressources. Un autre effet néfaste est celui de la régression des effectifs en insectes pollinisateurs ce qui fait baisser certains rendements agricoles et oblige, là aussi, à des méthodes substitutives. On pourrait croire que, s'agissant de la sécurité alimentaire, la technologie humaine suppléera la perte de la biodiversité, par exemple en créant des « espèces missionnées », génétiquement modifiées. Mais l'extraordinaire avantage de la biodiversité naturelle est qu'elle confère aux écosystèmes terrestres une grande résilience, c'est-à-dire une aptitude à résister aux perturbations. Lorsqu'une espèce ne joue plus pleinement son rôle, d'autres espèces se substituent à elle très rapidement par la dynamique des populations, ou un peu plus lentement par la dynamique évolutive. Un écosystème où la diversité est limitée, ou réduite à quelques espèces survivantes ou technologiques (génétiquement modifiées), est un système fragile. Confier notre sécurité alimentaire à des écosystèmes agricoles à faible biodiversité est un risque majeur qu'il conviendrait de ne pas courir.

Le second risque important concerne la santé, celle des humains mais aussi celle des animaux ou des plantes qu'ils élèvent. Certains écosystèmes, comme la forêt amazonienne, recèlent une très grande biodiversité que nous sommes loin d'avoir inventoriée. Ils recèlent donc des ressources potentielles importantes pour la

découverte et l'exploitation de nouvelles molécules dans les domaines des médicaments, ou plus généralement dans celui des produits de santé et de bien-être. Or des tels écosystèmes se réduisent rapidement, notamment en raison de la déforestation au profit de l'urbanisation ou de l'agriculture intensive.

Parmi les nombreuses autres conséquences de la perte de biodiversité, je me limite à citer ici celle de la réduction des zones humides (lagunes, marais). Ces zones abritent une biodiversité végétale et animale importante, sont souvent des sanctuaires de vie sauvage, jouent un rôle épurateur contre certaines pollutions, et servent de tampon contre les inondations. Leur suppression au profit de projets industriels ou urbanistiques, qui s'implantent là dans des secteurs inondables, présente naturellement un double risque, et ne peut être justifiée que par un intérêt collectif majeur, voire vital.

Les conséquences de la 6^{e} extinction pour la planète seront probablement équivalentes à celles d'autres grands évènements ou changements naturels qui se sont produits dans le passé et qui ont fortement réduit la biodiversité.

L'un des changements les plus anciens que l'on connaît est la crise toxique lorsque l'oxygène a commencé à s'accumuler dans l'environnement, il y a plus de 2 milliards d'années. Les espèces d'alors étaient principalement anaérobies, ce qui signifie qu'elles ne savaient pas se protéger de l'oxygène, ni le respirer, et que celui-ci était pour elles un poison toxique. La transition évolutive d'un monde dominé par les espèces anaérobies vers un monde dominé par les espèces aérobies, c'est-à-dire qui respirent l'oxygène et qui disposent de mécanismes de protection moléculaire internes, s'est faite au travers de la quasi-extinction des premières alors que les secondes émergeaient, se développaient, et se diversifiaient. Les espèces anaérobies n'ont toutefois pas complètement disparu puisque certaines se sont réfugiées dans des « niches » sans oxygène où elles subsistent encore aujourd'hui, des sédiments, des masses d'eau confinées, ou les organes digestifs des animaux. Un résultat évolutif remarquable est qu'à l'issue d'une telle crise, et plus de 2 milliards d'années plus tard, la biodiversité de notre microbiote intestinal, composé de bactéries procaryotes anaérobies, coopère fructueusement avec les organismes pluricellulaires que nous sommes, c'est-à-dire avec une biodiversité de cellules aérobies eucaryotes. Le caractère eucaryote, commun à toutes nos cellules, a été acquis au cours de la très longue évolution des bactéries primitives il y a plus de 2 milliards d'années, par des sélections génétiques naturelles de certaines de ces bactéries, et par la stabilisation de leur symbiose en une seule cellule capable de se reproduire comme un tout. Les

ancêtres de nos cellules eucaryotes, celles de nos organes, se sont dissociés en cela des bactéries procaryotes, ancêtres de celles que nous abritons, notre microbiote. La biodiversité de nos cellules eucaryotes tient à leurs spécialisations fonctionnelles pour former nos organes, le foie, le muscle, la peau, ou le sang. Ces spécialisations ont, elles, été acquises lors de notre bref développement embryonnaire et corporel, aussi par sélection naturelle, mais sur la base de caractères épigénétiques (activation ou inhibition de l'expression des gènes). Il est remarquable de constater ici l'efficacité adaptative de l'évolution biologique qui ne se contente pas de sélectionner des espèces, mais qui sélectionne aussi leurs coopérations bénéfiques. Les humains pourraient sans doute en tirer quelques leçons…

La grande crise toxique que je viens d'évoquer s'est produite dans une période très ancienne. Trop ancienne pour que des évènements et des disparitions d'espèces puissent y être finement étudiés ! Mais beaucoup d'autres grandes extinctions se sont probablement produites au cours de ces temps lointains appelés le Précambrien. Le Précambrien résume tout ce qui s'est passé sur la Terre il y a plus de 540 millions d'années, dont les archives naturelles (sédiments, fossiles, minéraux) ont été le plus souvent détruites par les mouvements tectoniques et l'érosion. Même si le Précambrien s'étale sur 4 milliards d'années, dont 3,5 milliards d'années avec la vie, les 5 grandes extinctions de masse les mieux étudiées appartiennent donc aux temps phanérozoïques, c'est-à-dire aux ères Primaire, Secondaire et Tertiaire qui se sont succédé au cours des dernières 540 millions d'années, soit seulement un neuvième de l'âge de la Terre.

La Terre a connu une première grande crise il y a environ 450 millions d'années alors que les espèces étaient encore exclusivement marines. Cette crise aurait été provoquée par une glaciation intense et se serait traduite par la disparition de 60 à 70 % des espèces.

Vers –360 millions d'années, une extinction d'environ 75 % des espèces se produisit en raison de variations climatiques marquées et d'une configuration géographique qui défavorisait la ventilation de certains océans par les courants de convection, donc leur oxygénation.

La plus grande des 5 extinctions du Phanérozoïque se produisit il y a environ 250 millions d'années, à la limite entre l'ère Primaire et l'ère Secondaire (limite Permien-Trias), en raison d'épisodes volcaniques généralisés. Près de 90 % des espèces terrestres et marines se seraient éteintes à cette occasion. Il y a environ 200 millions d'années (limite Trias-Jurassique), la quatrième extinction se produisit

sur un laps de temps important en raison d'une activité volcanique permanente et très étendue, associée à l'ouverture tectonique de l'océan Atlantique. On estime l'ampleur de cette extinction à 80 % des espèces environ.

La 5e extinction, qui se produisit il y a environ 65 millions d'années (limite Crétacé-Tertiaire), est sans doute la plus connue, car elle inclut l'extinction des grands reptiles, dont la plupart des espèces de dinosaures. Elle a été provoquée par la chute d'un astéroïde important, d'environ 10 kilomètres de diamètre, dans la péninsule du Yucatan (Chicxulub, Mexique). Les conséquences atmosphériques de l'impact furent globales et ont profondément modifié le rayonnement solaire et la production primaire de la photosynthèse pendant de nombreuses années, affectant ainsi toutes les espèces. Un épisode volcanique de grande ampleur, celui des Trapps du Deccan, s'est produit quelques dizaines de milliers d'années après l'impact météoritique de Chicxulub. Il a affecté la plaque tectonique de l'Inde qui migrait alors vers le Nord dans l'océan Indien et n'était pas encore entrée en collision avec la plaque asiatique pour former la chaîne himalayenne. Ce grand épisode volcanique a probablement amplifié la 5e extinction.

Les reconstitutions paléontologiques nous disent qu'après ces grandes extinctions, une nouvelle biodiversité importante s'est reconstituée en quelques millions d'années. De nouvelles espèces se sont imposées à partir de la sélection naturelle des espèces survivantes et de nouveaux écosystèmes se sont progressivement mis en place. Au bout de quelques millions d'années, ou moins, la vie s'est remise à prospérer sur la base d'une grande biodiversité, gage d'une sélection naturelle saine et efficace.

Il est donc raisonnable de penser que l'actuelle 6e extinction, causée par l'influence humaine, n'est qu'une perturbation de plus (ou une ponctuation selon les idées de l'évolutionniste Stephen Jay Gould) que la grande dynamique évolutive va corriger rapidement à l'échelle de temps de la Terre.

La question subsidiaire est de savoir si cette correction naturelle est compatible avec la poursuite du développement humain. Les humains sont aujourd'hui dans la situation d'une espèce proliférante à la limite des ressources qu'il lui est possible d'exploiter. Ils n'ont donc d'autre choix que de réduire fortement leur empreinte sur la biosphère et sur les milieux de vie, et d'imaginer une nouvelle société humaine capable de gérer les ressources vivantes, énergétiques et minérales. Une telle société serait, par nécessité, beaucoup moins consommatrice que celle d'aujourd'hui. Elle ne verrait plus les autres espèces, bactéries, champignons, plantes et animaux, comme

de simples ressources. Elle aurait conscience de partager avec elles un ancêtre commun. Qu'elles et nous appartenons à un même système planétaire ! Faute de ce choix, les humains subiraient nécessairement les dures conséquences des pénuries de ressources, conflits, famines, maladies, effondrements économiques, désorganisation et chaos. Ce n'est pas un risque pour la Terre, mais c'est le risque principal pour les humains.

8. Les risques à court terme de l'activité humaine pour les humains

Pour toutes les espèces non humaines, les risques sont exclusivement exogènes, c'est-à-dire qu'ils dépendent des aléas naturels et de la concurrence des autres espèces. L'espèce humaine n'a plus vraiment d'espèces concurrentes mais reste soumise aux aléas naturels. Néanmoins, le développement accéléré de la société humaine peut augmenter, ou même créer, les risques liés aux aléas naturels exogènes. Cette augmentation des risques présente alors un caractère partiellement endogène puisque c'est l'activité humaine qui la dimensionne.

Parmi les aléas exogènes encourus par l'humanité figurent notamment les chutes d'astéroïdes importants, les séismes et les éventuels tsunamis associés, les méga-éruptions volcaniques et les éruptions solaires. Mais le risque, qui n'est pas l'aléa, est d'autant plus grand que la population humaine est exposée, en raison de sa concentration urbaine ou de ses infrastructures. Il est évident qu'un tremblement de terre de magnitude 8 sur la dorsale médio-atlantique à 3 000 m de profondeur ne présente aucun risque, alors qu'il aurait des effets terrifiants s'il se produisait près de Nice, d'Istanbul, de Tokyo ou de San Francisco. Ce risque comporte donc un aspect endogène.

L'aléa strictement exogène des éruptions solaires montre à quel point le développement humain a créé un risque important, dont la cause (l'aléa) est exogène, et dont l'ampleur est endogène. En effet, la technologie électronique très sophistiquée qui soutient aujourd'hui les activités humaines (communication, satellites, gestion et salaires informatisés, commerce, moyens de navigation...) est très sensible aux flux de rayonnements très énergétiques (rayons X et gamma) et de particules ionisées qui nous parvient du soleil (vent solaire). Or ces flux s'intensifient pendant les phases d'éruption solaire, avec des paroxysmes qui peuvent mettre à mal nos réseaux électriques, de communication, de navigation et d'autres systèmes

électroniques. Une très grosse éruption solaire s'est produite en 2023, fort heureusement sur la face du soleil opposée à la Terre. Une autre avait provoqué la coupure du réseau électrique au Québec en 1989. La tempête solaire la plus puissante enregistrée s'est produite en 1859. Elle s'est manifestée par des aurores polaires visibles jusque dans les basses latitudes (mer des Caraïbes) et a fortement perturbé les télécommunications par télégraphe de l'époque. Les conséquences auraient été bien plus grandes dans le contexte technologique actuel de la société humaine.

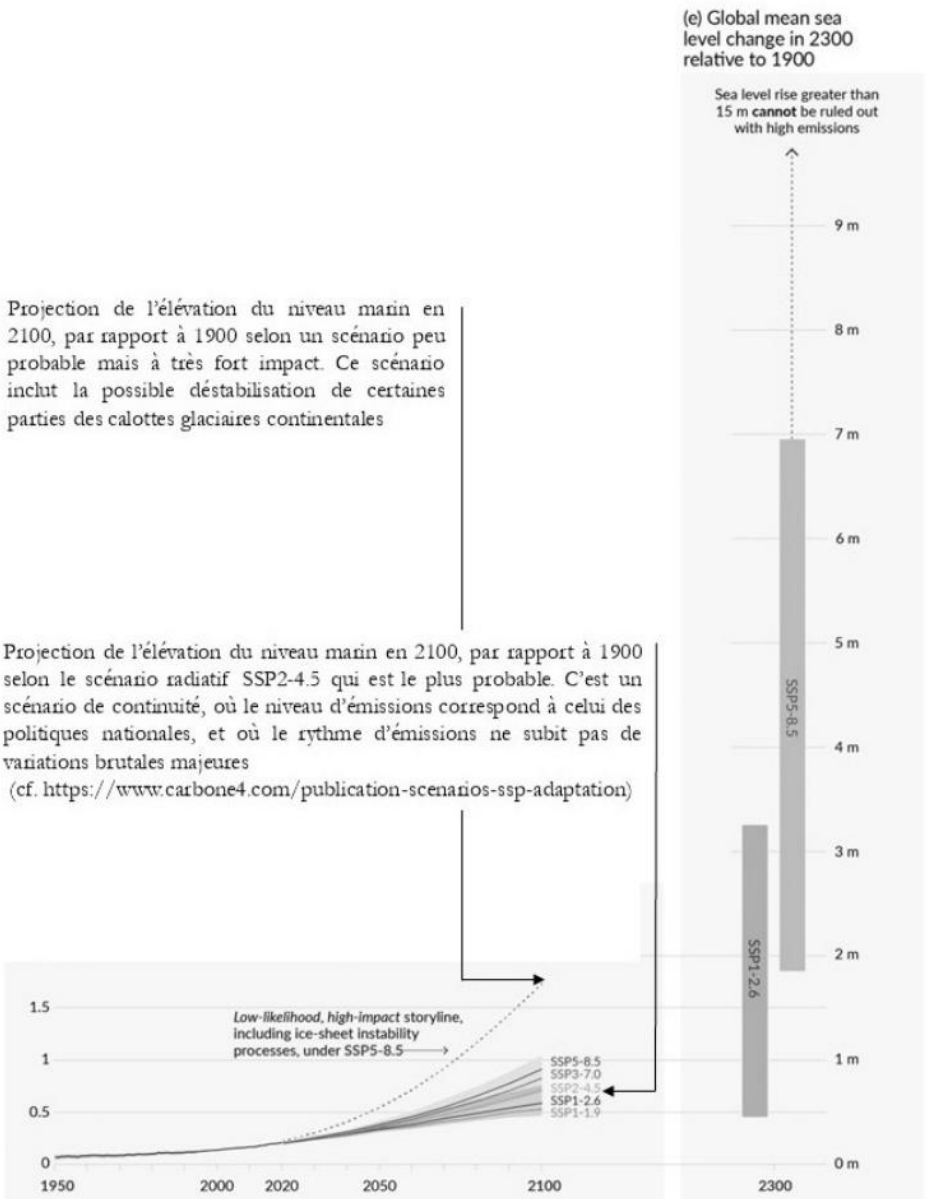
Une autre catégorie de risques est liée au changement climatique en cours. Ici il n'est pas question d'aléa puisque la science nous a alertés depuis des décennies sur l'ampleur prévisible de ce changement, sur le fait que les activités humaines en sont la cause, et sur son extrême rapidité qui le distingue des variations climatiques naturelles. Nous connaissons donc les risques inhérents, ceux-ci sont strictement endogènes, et nous avons donc le pouvoir de les réduire. Ce sont les destructions provoquées par des évènements extrêmes, comme des cyclones, qui se produisent plus fréquemment et peut-être avec des puissances accrues. Ce sont aussi les dégâts ou les pertes de récoltes dus à des épisodes prolongés de pluies intenses, ou de sécheresse, sur certaines régions. C'est enfin la submersion temporaire de zones littorales, ou celle permanente de régions entières, en raison de la hausse du niveau marin (niveau moyen de la surface des océans par rapport au géoïde, ou à l'ellipsoïde terrestre de référence). Cette hausse est provoquée à la fois par la dilatation de la masse globale de l'eau de mer et par la fonte des glaces continentales, notamment celles des calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland. D'après le *GIEC*, les différentes projections modélisées de hausse de niveau marin, selon certains scénarios d'évolution de l'effet de serre en fonction de ce que nous (les humains) ferons, rendent probable une élévation d'environ 70 cm entre 1900 et 2100, ce qui signifierait une élévation supplémentaire de l'ordre de 65 cm par rapport au niveau marin de 2021 (**Figure 7.5**). Mais une grande incertitude tient à l'imprévisibilité de la déstabilisation des calottes glaciaires continentales dans certaines régions comme le pourtour antarctique de la mer de Weddell (là où se détachent périodiquement d'immenses icebergs tabulaires, issus de ce que l'on appelle la plate-forme de glace ou *ice-shelf)*. Si cette déstabilisation se produisait, le flux de glace vers l'océan pourrait augmenter considérablement, ce qui accélérerait la hausse du niveau marin jusqu'à des valeurs de 1,5 m ou plus en 2100.

D'après le *GIEC*, la hausse du niveau marin en 2 100 se situera le plus probablement autour de + 70 cm par rapport à 1900. Mais une hausse beaucoup plus importante n'est pas à exclure si certaines parties des calottes glaciaires venaient à être significativement déstabilisées. Dans cette hypothèse, la hausse en 2100 pourrait atteindre plus de 2 m. Les projections à un peu plus long terme (2300) sont comprises entre 2 et 7 m sauf si la société humaine parvenait à s'engager très rapidement sur une réduction massive globale des émissions de gaz à effet de serre (peu probable). Mais une hausse supérieure à 15 m ne peut être exclue dans l'hypothèse du maintien de fortes émissions et de fonte accélérée de la calotte groenlandaise et de certaines parties de la calotte antarctique. Bien entendu, toutes ces projections signifient que d'immenses surfaces aujourd'hui occupées par les populations humaines et leurs infrastructures seraient demain inexploitables, et que les générations futures de l'humanité devraient organiser d'énormes relocalisations de populations et d'activités économiques.

Figure adaptée issue du rapport IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: ***Cli**ma**te** **C**ha**n**ge 2021: The Ph**ysical** **Sci**enc**e** B**asis**. **Co**ntri**bu**tio**n** **o**f **Wor**k**i**ng G**rou**p **I** t**o** the **Si**xth **Ass**e**ss**ment **R**ep**or**t **o**f the **I**nterg**o**ver**n**ment**al** **P**an**el** **o**n **Cli**m**a**te **C**h**a**nge* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.

Projection de l'élévation du niveau marin en 2100, par rapport à 1900 selon un scénario peu probable mais à très fort impact. Ce scénario inclut la possible déstabilisation de certaines parties des calottes glaciaires continentales

Projection de l'élévation du niveau marin en 2100, par rapport à 1900 selon le scénario radiatif SSP2-4.5 qui est le plus probable. C'est un scénario de continuité, où le niveau d'émissions correspond à celui des politiques nationales, et où le rythme d'émissions ne subit pas de variations brutales majeures
(cf. https://www.carbone4.com/publication-scenarios-ssp-adaptation)



Un autre risque endogène a émergé en raison de l'utilisation généralisée des technologies de l'information. Toutes les données requises pour nos salaires, nos soins, nos remboursements, notre citoyenneté, notre gestion bancaire, nos impôts, nos achats et nos loisirs, sont désormais saisies et stockées numériquement. L'essentiel des échanges financiers, au premier rang desquels le paiement des salaires, relève d'algorithmes numériques, et beaucoup de grandes entreprises ou de services d'État seraient bien en peine de payer leurs employés autrement. L'essentiel de la gestion de nos réseaux d'énergie et de transports relève également d'algorithmes informatiques. Ceci crée bien sûr un champ de fragilités vis-à-vis d'intentions hostiles (guerre numérique entre états ou entre grandes entreprises concurrentes, terrorisme, influences occultes) ou malveillantes (racket, cybercriminalité). Que se passerait-il si une action hostile parvenait à stopper durablement le paiement des salaires publics d'un état, ou ceux d'une très grande entreprise à dimension stratégique, comme par exemple la distribution d'énergie électrique ? Même si les employés peuvent avoir quelques réserves financières, la conséquence immédiate serait un coup de frein brutal sur la consommation, donc sur toute l'activité économique en aval, et très rapidement une récession économique majeure. Celle-ci pourrait même se traduire pour une situation de large désorganisation, voire chaotique.

Enfin, d'autres risques importants sont liés à l'épuisement global ou local des ressources. Les ressources en énergie, en eau et en matières premières ne sont pas uniformément réparties à la surface de notre planète. Dans un scénario ou chaque entité géopolitique continuerait à jouer sa propre partition sans se soucier des équilibres généraux (accès équitables aux ressources compte tenu des niveaux de développement, sobriété des plus nantis), les risques de conflits ne pourraient que s'accroître.

9. Le risque d'un emballement irréversible du système climatique ?

Nous savons que la Terre n'a pas toujours été habitable. Il a fallu quelques centaines de millions d'années pour atteindre une première habitabilité (conditions minimales, ou habitabilité objective), puis cette habitabilité s'est profondément modifiée au travers d'une transition entre des milieux de vie sans oxygène et des milieux de vie riches en oxygène.

La modification anthropique du climat peut-elle aller jusqu'à entamer profondément l'habitabilité de la Terre pour les humains, voire même jusqu'à rendre la Terre inhabitable pour tous les êtres vivants ?

Sur la première partie de cette question, la réponse est clairement oui. L'habitabilité pour les humains est déjà dégradée et le processus va se poursuivre. Il y a déjà des dizaines de millions d'êtres humains déplacés pour des raisons climatiques à travers le monde, en raison de la hausse du niveau marin (notamment dans certains grands deltas très peuplés comme celui du Gange), ou en raison des crises agricoles provoquées par des sécheresses prolongées. Si le réchauffement climatique peut rendre certaines zones des hautes latitudes plus habitables, il a un effet négatif dans les régions équatoriales très humides. Ces régions sont parcourues par la migration saisonnière de l'équateur météorologique (ou zone de convergence intertropicale, ZCIT). Elles sont caractérisées par une température toujours élevée, qui se combine avec une très forte humidité ambiante, notamment lorsque la ZCIT les traverse. En effet, au-dessus de 30 °C, la hausse des températures est d'autant moins bien supportée que l'humidité est forte. Comme ces régions sont beaucoup plus peuplées que les régions des hautes latitudes, l'effet négatif sur l'habitabilité des humains l'emporte.

À la seconde partie de la question, celle de l'inhabilité, il n'y a aucune certitude et on doit se contenter de scénarios hypothétiques. Le premier scénario est celui où, face à une profonde dégradation de l'habitabilité et à l'épuisement des ressources, la société humaine s'écroule (démographie, organisation, échanges), et où, en conséquence, ses émissions de gaz à effet de serre cessent, ou se réduisent à un niveau négligeable. Dans un tel scénario, le pollueur épuise son environnement et subit les lois écologiques d'une régulation naturelle qui diminue sa population ou la font disparaître. C'est à mon avis le scénario le plus probable si les humains n'engagent pas une auto-réduction très importante de leurs impacts sur l'environnement. Il devrait aboutir à un changement profond, mais pas irréversible du climat. Je décris un peu plus loin les capacités de résilience du système Terre qui s'exerceraient alors.

Mais un second scénario est celui où les humains pourraient encore amplifier leurs impacts en supposant que ce développement ne soit pas entravé par l'épuisement des ressources, ce qui est très peu probable. Si les réserves géologiques en hydrocarbures

(pétrole, gaz, sables bitumineux) ainsi qu'en kérogène (charbon, tourbe, lignite, matière organique des schistes) sont considérables, les ressources exploitables dépendent des conditions économiques.

Hydrocarbures et kérogène, les deux catégories moléculaires de la matière organique sédimentaire

Le kérogène désigne la matière organique sédimentaire qui ne s'est pas, ou pas encore, transformée en hydrocarbures (pétrole ou gaz) sous l'effet d'un long chauffage géologique modéré. Le kérogène se forme d'abord à partir des molécules organiques biologiques incorporées dans les sédiments. Il est un conglomérat macromoléculaire solide très stable en l'absence d'oxygène, que seul un chauffage de courte durée à forte température (craquage par pyrolyse), ou de longue durée à plus basse température (craquage géologique naturel) peut déstructurer. Techniquement, il est la fraction de cette matière organique qui est insoluble dans des solvants organiques comme l'acétone (C_3H_6O), le dichlorométhane (CH_2Cl_2), le tri-chlorométhane (chloroforme, $CHCl_3$), ou le benzène (C_6H_6).

C'est ainsi qu'après avoir été sans intérêt économique en raison du coût de leur extraction par rapport à leur prix de vente, les sables ou les schistes bitumineux sont maintenant exploités. Aux conséquences en termes d'émission de CO_2 s'ajoutent les importants dégâts à l'environnement causés par leur extraction minière à ciel ouvert. Même si c'est peu probable, on peut donc, hélas, craindre que l'horizon des ressources soit encore repoussé par une société humaine résiliente et que beaucoup plus de CO_2 soit accumulé dans l'atmosphère. Dans ce cas, le climat se réchaufferait bien davantage avec des effets rétroactifs positifs qui amplifieraient encore ce réchauffement, comme la disparition de l'albédo lié aux surfaces de glace et de neige, la libération du méthane géologique ou biologique actuellement piégé sous forme d'hydrates gelés dans le permafrost et les sédiments des marges continentales des hautes latitudes, et l'augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère. Au travers d'un tel réchauffement, le climat franchirait des points de basculement pour

s'installer dans des modes très différents, mais beaucoup plus chauds et sans doute très défavorables à de nombreux groupes d'êtres vivants (dont les humains bien sûr !).

Bien après la fin du dernier îlot de vie, le seuil ultime serait atteint si la température (200 à 300 °C, ou plus) était telle que la vapeur d'eau ne pouvait plus précipiter en pluie et s'accumulait indéfiniment dans l'atmosphère, même à une pression élevée. Le climat basculerait alors dans l'emballement final, celui où les carbonates solides se décomposeraient thermiquement et où, en conséquence, le carbone solide retournerait à l'état gazeux (CO_2). La matière organique sédimentaire suivrait le mouvement en consommant l'oxygène résiduel. L'atmosphère de la Terre retrouverait alors son état primordial d'il y a 4,5 milliards d'années, et ressemblerait à celle de Vénus. La Terre serait définitivement inhabitable !

10. Vous avez dit géo-ingénierie ?

Des voix proclament que le salut adaptatif de l'humanité viendra de la technologie, appliquée à des corrections globales dans le fonctionnement du système Terrestre. C'est ce que l'on appelle la géo-ingénierie.

Une idée est de disséminer dans l'atmosphère des microparticules réfléchissantes qui augmenteraient l'albédo, c'est-à-dire la proportion du rayonnement solaire réfléchi vers l'espace, et compenseraient ainsi le réchauffement actuel. Une autre idée technologique est de décarboner l'atmosphère en capturant et en stockant (ou en transformant) industriellement le dioxyde de carbone (CO_2).

Une troisième idée est d'ensemencer certaines zones de l'océan en fer afin d'y stimuler la productivité primaire (photosynthèse) utilisatrice de CO_2, et de renforcer ainsi l'exportation de carbone vers l'océan profond (pompe de CO_2).

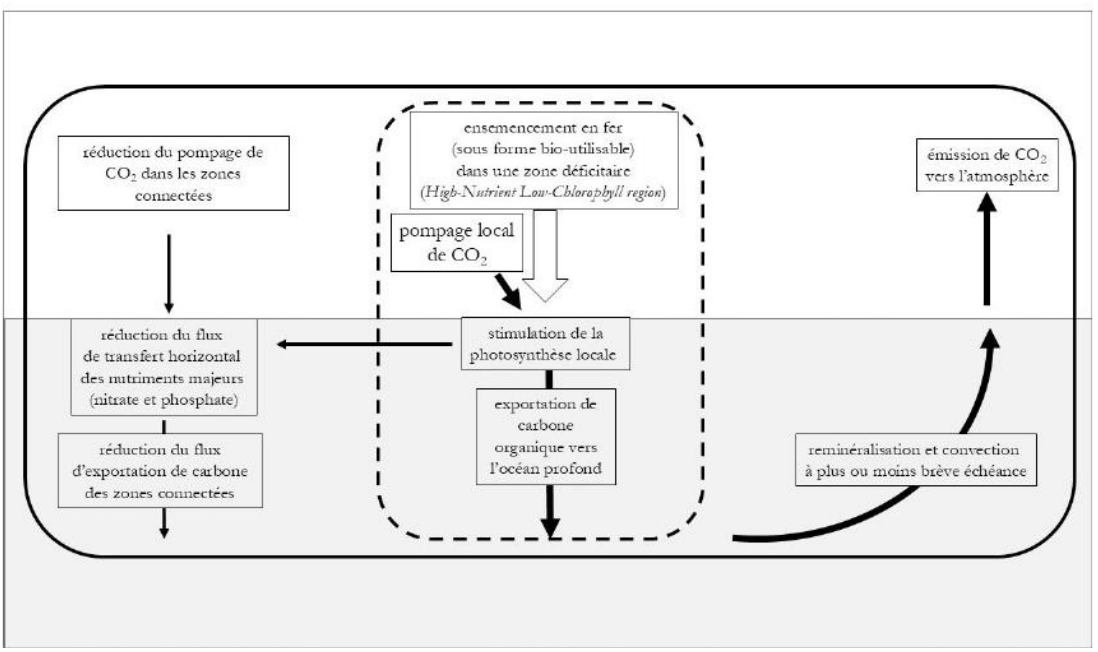
La faisabilité technologique et le coût énergétique de ces projets sont encore largement en débat. D'une part leur bilan global en termes de réduction de gaz à effet de serre doit être significativement positif, ce qui est loin d'être démontré et, d'autre part, on peut craindre qu'elles constituent, avant même la démonstration de leur efficience, des effets d'aubaine pour des intérêts industriels et bancaires. Par ailleurs, ces propositions mettent le projecteur sur quelques effets physiques et chimiques de premier niveau, mais passent en général sous silence l'analyse des conséquences systémiques.

Poussons donc un peu plus loin le raisonnement sur l'exemple de l'ensemencement en fer de l'océan (**Figure 7.6**) ! Dans certaines zones de l'océan de surface, les nutriments majeurs (nitrate et phosphate) sont abondants, mais les apports en fer sont insuffisants ce qui limite la photosynthèse. Ces zones sont appelées *HNLC* (high nutrient, low chlorophyll). La solution proposée s'appuie donc sur le principe simple d'une dynamique bio-géo-chimique strictement locale (verticale). Si on apporte du fer, la photosynthèse locale est favorisée en utilisant le CO_2 dissout dans l'eau de mer. Une partie de la matière organique produite coule vers le fond de l'océan ce qui aboutit *in fine* à pomper du CO_2 de l'atmosphère puisque les teneurs (pressions partielles) en CO_2 de l'océan et de l'atmosphère tendent à s'équilibrer. L'essentiel du carbone transféré vers le fond de l'océan est minéralisé en CO_2 par les actions bactériennes, puis remonté vers la surface par la convection océanique. Mais ce retour prend du temps, peut-être plusieurs siècles. On pourrait donc considérer *a priori* que ce mécanisme contribue temporairement à la réduction de l'effet de serre.

Cependant, aucune zone de l'océan n'est réellement isolée. Les courants de convection et les courants horizontaux les relient les unes aux autres. La circulation horizontale aboutit toujours à transférer les nutriments non utilisés, par exemple en raison de la carence en fer d'une certaine zone, vers une autre zone où ils seront utilisés car le fer y sera plus abondant. En d'autres termes, la stimulation industrielle de la photosynthèse dans une région de l'océan limitera nécessairement la photosynthèse ailleurs. Il est donc possible que l'effet espéré de pompage de CO_2, global et intégré dans le temps, n'existe pas. Ceci montre que des études approfondies doivent être menées avant d'engager une opération de géo-ingénierie de grande ampleur. Personnellement, je doute même que tous les effets systémiques puissent être correctement recensés et quantitativement évalués en raison de la sensibilité aux conditions initiales (effet papillon) et de notre connaissance encore très imparfaite du système Terrestre.

Le bilan local et le bilan systémique d'une opération d'ingénierie telle que l'ensemencement en fer de certaines zones de l'océan peuvent être très différents. Le bilan à très court terme, évalué à l'échelle de la zone opérée (périmètre hachuré), est un pompage net de CO_2. Le bilan systémique évalué à moyen et long terme à l'échelle de l'océan global peut être nul, voire être une réduction globale du pompage de CO_2. L'utilité de toute solution de géo-ingénierie se voulant répondre à l'intérêt général doit donc être soigneusement évaluée de manière systémique.

D'après *Planète Terre, notre seul vaisseau dans l'Univers*, Philippe Bertrand, TheBookEdition, 2023.


réduction du pompage de CO_2 dans les zones connectées
ensemencement en fer (sous forme bio-utilisable) dans une zone déficitaire (*High-Nutrient Low-Chlorophyll region*)
pompage local de CO_2
émission de CO_2 vers l'atmosphère
réduction du flux de transfert horizontal des nutriments majeurs (nitrate et phosphate)
stimulation de la photosynthèse locale
réduction du flux d'exportation de carbone des zones connectées
exportation de carbone organique vers l'océan profond
reminéralisation et convection à plus ou moins brève échéance

11. La résilience du système Terre face à la perturbation anthropique

Le système Terre dispose de puissants mécanismes naturels qui le stabilisent, de la même façon qu'un être vivant dispose de mécanismes physiologiques qui stabilisent sa santé. De ce point de vue, notre planète n'aurait aucune difficulté à gommer la perturbation anthropique si l'influence des activités humaines s'arrêtait aujourd'hui. La question est plutôt celle des échelles de temps nécessaires. Selon les mécanismes naturels impliqués, les effets correcteurs peuvent s'exercer en quelques siècles, quelques milliers d'années, ou quelques millions d'années.

Rappelons d'abord que nos activités utilisent principalement, depuis 2 à 3 siècles, le stock d'énergie chimique fossile de la Terre ! Nous extrayons du charbon, du pétrole et du gaz pour les faire réagir avec l'oxygène de l'air. Par-là, nous convertissons l'énergie chimique fossile en une énergie correspondant à nos besoins, essentiellement du mouvement. La chaleur et l'électricité ne sont souvent que des formes d'énergie intermédiaires, elles n'ont un usage direct que pour les activités exigeant du chauffage (chauffage domestique, cuisine, sidérurgie, raffinage, plasturgie...), ou pour celles qui traitent et stockent l'information (ordinateurs, serveurs, réseaux, internet...). Depuis quelques décennies, nous avons exploité en plus deux autres sources d'énergie, celle la fission nucléaire contrôlée et celle de l'énergie solaire (barrages, éoliennes, cellules photovoltaïques, biomasse).

Le stock de combustibles fossiles que nous avons brûlé s'était accumulé sur des millions d'années, grâce à la photosynthèse et à la sédimentation qui ont alors soustrait du CO_2 de l'atmosphère et de l'océan. Celui-ci a été libéré par nos activités et se retrouve en excès dans l'atmosphère et dans l'océan. La photosynthèse et la sédimentation ne recapturerons pas la totalité du CO_2 en excès avant des millions d'années. Mais d'autres phénomènes naturels peuvent réduire l'excès de CO_2 atmosphérique, donc l'effet de serre, à des échelles de temps plus courtes.

Le premier d'entre eux est l'effet tampon de l'océan décrit dans le chapitre 2, qui s'exerce sur une échelle de temps de quelques siècles. Les pressions de CO_2 dans l'atmosphère et de CO_2 dissous dans l'océan tendent à s'équilibrer, ce qui aboutit à transférer du carbone de l'atmosphère à l'océan. L'océan maintient son acidité et son équilibre chimique, notamment celui des formes du carbone minéral dissous, au travers de la dissolution des carbonates sédimentaires. L'aboutissement est

simplement un contenu plus élevé en carbone minéral, avec des teneurs plus élevées en dioxyde de carbone (CO_2), carbonate (CO_3^{2-}) et bicarbonate (HCO_3^-). Mais le processus de transfert s'arrête lorsque les pressions de CO_2 sont équilibrées et ne peut pomper complètement le CO_2 en excès dans l'atmosphère. Au bout du compte, le carbone déstocké par nos activités reste déstocké mais il n'est plus exclusivement dans l'atmosphère, il se répartit entre l'atmosphère et l'océan.

Un second processus naturel pourrait renvoyer, en quelques dizaines ou centaines de milliers d'années, le carbone déstocké vers les sédiments, mais sous forme de carbonates plutôt que sous forme de matière organique. Ce processus a aussi été décrit dans le chapitre 2. Il s'agit de l'altération des roches aluminosilicatées, dont les basaltes issus de l'activité volcanique. Cette altération utilise le CO_2 atmosphérique et induit une chaîne de phénomènes dont l'aboutissement est la formation de sédiments carbonatés. Son bilan est donc un transfert de carbone de l'atmosphère vers les sédiments. Il convient toutefois de dire ici que ce processus est modulé par le type d'activité volcanique qui domine la Terre à une période géologique donnée. Son effet correctif ne s'exercera donc pas forcément dans les quelques dizaines de milliers d'années à venir.

Certains effets secondaires de la perturbation anthropique, comme la hausse du niveau marin, seront irréversibles à court terme (milliers d'années). En effet cette hausse est principalement imputable à la fonte des glaces continentales comme celles qui se sont accumulées sur l'Antarctique et le Groenland pendant des centaines de milliers d'années. Par ailleurs, une dynamique d'accumulation glaciaire future, qui reconstituerait le volume de glace d'avant l'ère industrielle, exigerait probablement une profonde modification naturelle du climat. Or, l'analyse prédictive des mouvements orbitaux de la Terre écarte la possibilité d'un nouveau refroidissement majeur avant environ 70 000 ans.

La perturbation anthropique induit aussi une perte de biodiversité massive et très rapide des espèces, touchant notamment les grands organismes pluricellulaires (plantes, insectes, vertébrés…). Or l'étude des fossiles (paléontologie) nous a appris qu'à partir des extinctions de masse du passé, une biodiversité d'espèces équivalente, mais différente, se reconstituait en quelques millions d'années, ce qui est long à l'échelle de temps des humains, mais très court à l'échelle de temps géologique. Associées à la sélection naturelle, de telles ponctuations seraient même, selon l'évolutionniste Stephen Jay Gould, un des mécanismes moteurs de l'évolution biologique. La vitesse de reconstitution d'une biodiversité à partir d'une espèce

dépend de la durée moyenne d'une génération à une autre. Elle peut être très rapide pour les bactéries, de l'ordre de quelques mois ou années, alors qu'elle peut demander des millions d'années pour les espèces végétales ou animales de grands organismes pluricellulaires. Si l'on considère la biodiversité spécifique globale, celle de la biosphère, il faudra donc quelques millions d'années avant qu'elle soit pleinement reconstituée, avec de nouvelles espèces car les espèces disparues le sont à jamais.

12. L'émergence d'une intelligence collective salvatrice ?

Arrivé au terme de cette rédaction, une question finale me vient à l'esprit qui est de savoir si les humains, qui font partie du système Terre, peuvent jouer un rôle dans la résilience planétaire face à des risques qu'ils ont eux-mêmes créés. Plusieurs intelligences s'exercent ici. Il y a d'abord celle de l'intelligence individuelle des humains, propriété sélectionnée par l'évolution et qui nous a permis de tant prospérer à l'échelle planétaire, aux dépens de la plupart des autres espèces sauf peut-être des bactéries et des archées. Il y a ensuite l'intelligence collective des humains qui nous a permis de nous organiser collectivement dans un but expansif et conquérant. Mais cette intelligence collective n'a pas encore intégré la nécessité d'adapter notre développement à un monde où les ressources sont limitées, et désormais proches de leur épuisement au rythme où nous les utilisons. Il y a enfin l'intelligence inconsciente du système Terre lui-même, lui qui exerce ses mécanismes créateurs et régulateurs (son autopoïèse) en répondant aux propriétés combinatoires de la matière et de l'information, c'est-à-dire sans état d'âme (âme qu'il n'a pas) et sans se soucier de qui, de quoi, ou de comment. À la lumière de ce que nous savons aujourd'hui, nous n'avons pas d'autre choix que d'étendre le champ de notre intelligence collective si nous voulons que nos descendants continuent d'exister dans le giron de la Terre autopoïétique, cette planète systémique, génétique et adaptative, issue de la longue histoire de la structuration de la matière dans l'univers.

Table des matières

Avant-propos

CHAPITRE 1

L'état le plus structuré de la matière

1. Hasard et nécessité ?
2. La structuration de la matière, à la fois microscopique et macroscopique
3. La beauté dans la structuration de la matière
4. Quelle est l'origine de la matière ?
5. D'où vient la diversité chimique de la matière ?
6. La structuration stellaire et planétaire de la matière
7. La structuration de la matière non vivante sur la Terre
8. La première habitabilité de la Terre
9. Quand la structuration de la matière devient adaptative
10. Qu'appelle-t-on les cycles de matière ?
11. La structuration fractale et dynamique de la matière terrestre
12. Une structuration porteuse et gardienne de l'information
13. La Terre, un tableau à la fois universel et unique

CHAPITRE 2

Vers l'habitabilité

1. Préambule sur les habitants et l'habitabilité
2. La Terre primitive était inhabitable
3. Le rôle fondateur précoce des premiers océans
4. Les premiers océans et la réduction de l'effet de serre primitif
5. L'océan, régulateur de l'effet de serre depuis 4 milliards d'années
6. L'océan, médiateur chimique du carbone sur notre planète
7. Qu'appelle-t-on le paradoxe du Soleil jeune ?
8. La tectonique des plaques et l'effet de serre

CHAPITRE 3

La Terre et l'information ou la Terre génétique

1. La structuration de la matière est d'abord une accumulation d'information
2. Qu'est-ce que l'information génétique ?
3. L'information génétique, l'adaptabilité et la régulation

4. Le début de l'information biologique, ou l'émergence de la vie
5. L'information génétique n'est pas égoïste

CHAPITRE 4
La Terre et l'énergie
La machine énergétique la plus aboutie grâce aux émergences de la photosynthèse et de la respiration
1. Qu'est-ce que l'énergie ?
2. Le bilan énergétique de la Terre
3. Le flux géothermique, faible mais si important pour la vie !
4. L'énergie chimique accumulée, un des secrets de la Terre

CHAPITRE 5
La Terre et l'habitabilité évolutive
1. Partout où la vie est possible, mais à chacun son habitabilité !
2. Les conditions objectives d'habitabilité, requises par tous les êtres vivants
3. Les conditions dynamiques héritées de la formation du système solaire
4. Des propriétés complémentaires acquises au début de l'histoire de la Terre
5. Un acquis tardif, la couche d'ozone stratosphérique
6. La vie agit localement et globalement sur les milieux habitables
7. Des évolutions adaptatives ont contribué à réguler l'habitabilité globale
8. Une régulation de l'habitabilité globale ?

CHAPITRE 6
Les régulations du système Terre
1. Qu'est-ce qu'une vraie régulation ?
2. Parler d'autorégulation du système Terre est une trivialité
3. La régulation de l'effet de serre, un mécanisme abiotique
4. La régulation des nutriments océaniques, une dynamique de populations
5. La régulation de l'oxygène, la plus belle expression de l'autopoïèse terrestre
6. La théorie Gaia
7. Le Monde des Pâquerettes (Daisy World)

CHAPITRE 7
La Terre et les humains
Et l'homme dans tout cela !
1. Le temps humain et le temps de la Terre
2. Notre ancêtre commun LUCA
3. L'habitabilité subjective des humains et sa globalisation
4. L'extraordinaire capacité acquise par les humains de mobiliser l'énergie
5. L'impact de l'humain sur ses milieux de vie

6. L'impact humain sur le climat et l'environnement global
7. L'impact humain sur la biodiversité et ses conséquences
8. Les risques à court terme de l'activité humaine pour les humains
9. Le risque d'un emballement irréversible du système climatique ?
10. Vous avez dit géo-ingénierie ?
11. La résilience du système Terre face à la perturbation anthropique
12. L'émergence d'une intelligence collective salvatrice ?